

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto  
Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Matti L. J. Löytty

Staattisen sähköpurkauksen sietokyvyn testauslaitteiden kalibrointijärjestelmä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkistettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.6.2007

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen  
Ohjaaja: TkT Jari Hällström

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Abstract of the Master's Thesis

Author: Matti L. J. Löytty

Title of thesis: Calibration System for Electrostatic Discharge Immunity Testers

Date: 4.6.2007

Pages: 77+12

Department: Department of Electrical and Communications Engineering

Professorship: S-18 Power Systems and High Voltage Engineering

Supervisor: Professor Matti Lehtonen

Instructor: D. Sc. Jari Hällström

MIKES (Centre for Metrology and Accreditation in Finland) is responsible for conservation of Finnish measurement standards. Since 1995 the laboratory of Power Systems and High Voltage Engineering in Helsinki University of Technology has been responsible for conservation of the Finnish high-voltage measurement standards under coordination of MIKES. Electrostatic discharge (ESD) is high voltage quantity in excess of 1 kV and therefore calibration of electrostatic discharge testers is on the responsibility area of TKK's High Voltage laboratory. Highest contact discharge level according to IEC-standard is  $\pm 8$  kV. However, another international standard ISO 10605:2001 requires a maximum discharge level of  $\pm 25$  kV. This master's thesis describes development of a calibration system for electrostatic discharge immunity testers.

The rise time of an ESD impulse according to IEC standard 61000-4-2:1995 is from 0.7 ns to 1 ns. Such a fast rise time means high frequencies. High frequencies cause reflections in calibration system. Significance of the reflections is evaluated and frequency error correction factor is developed.

A target adapter line for measuring the frequency response of the target, together with attenuator and cable chain, has been developed. Frequency response correction method has been verified. The target adapter line is a simple, short and symmetrical transmission line for connection of a high frequency signal analyzer to the target.

Development of the target adapter line and frequency response correction method focused on simplicity. The project delivered a simple target adapter line consisting only one N type radio frequency male connector with a minor modification. Frequency response correction factor can be calculated directly from the S parameters of the transmission line, and input impedance of the measuring oscilloscope. Simplicity enables easy understanding, easy system upkeep, further development and effective calibration of testers.

The outcome of the project includes the development of a target adapter line, method for determination of uncertainty, method for realizing traceability to national measurement standard and a method for realizing international comparability. This thesis provides methods for improvement of electrostatic discharge measurement accuracy.

Keywords: electrostatic discharge, target adapter line, traceability, uncertainty, calibration, repeatability

## TEKNILLINEN KORKEAKOULU

## Diplomityön tiivistelmä

Tekijä: Matti L. J. Löytty

Työn nimi: Staattisen sähköpurkauksen sietokyvyn testauslaitteiden kalibrointijärjestelmä

Päivämäärä: 4.6.2007

Sivumäärä: 77+12

Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Professuuri: S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Työn valvoja: Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja: TKT Jari Hällström

Työssä on kehitetty staattisen sähköpurkauksen (ESD) sietokyvyn testauslaitteen kalibrointijärjestelmää. ESD on suurjännitesuure johtuen sen yli 1 kV:n jännitetasoista. IEC:n ESD-sietokyvyn testausta käsittelevässä standardissa 61000-4-2 ESD-impulssin kontaktipurkauksen jännitetasot ovat korkeintaan  $\pm 8$  kV. IEC-standardin ESD-impulssin nousuajat ovat 0,7 – 1 ns. ESD-impulssin nopeudesta johtuen kalibrointijärjestelmän ominaisimpedanssiepäsovitukset vaikuttavat mittauksiin aiheuttaen taajuusvastevirhettä korkeilla taajuuksilla. Heijastuksien merkittävyys arvioidaan ja vaikutus tarvittaessa korjataan.

Kalibrointijärjestelmää on kehitetty käyttäen lähtökohtana olemassa ollutta referenssijärjestelmää, IEC-standardia 61000-4-2 ja sen luonnoksia. Referenssijärjestelmästä puuttui kohtioadapteri, kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvastemittaukseen piirianalysaattorilla. Työssä on kehitetty kohtioadapteri.

Kohtioadapterin vaatimustenmukaisuus todettiin mittaamalla kahta kohtioadapteria vastakkain. Kohtioadapterin mahdollistamien kohtion, vaimentimen ja kaapelin mittausten saatavasta taajuusvasteesta ja oskilloskoopin impedanssivasteesta lasketaan kalibrointijärjestelmän taajuusvastevirheen korjauskerroin. Kohtioadapteri täyttää IEC-standardin luonnosehdotuksen 2007 vaatimukset 3 GHz:n taajuuskaistalla.

Kehitetyn kalibrointijärjestelmän kalibrointimenetelmä ja sen työkalut: kohtioadapteri, taajuusvasteen korjausmenetelmä, Monte Carlo-menetelmä ovat yksinkertaisia ja dokumentoituja. Yksinkertaisuus ja dokumentointi parantavat toistettavuutta.

Kehitetty kohtioadapteri on valmistuskustannuksiltaan kaupallisiin vastaaviin verrattuna edullinen, koska sen valmistamiseen ei vaadita erikoisosaamista ja tarvittavat työkalut ovat yksinkertaisia. Kohtioadapteri on modifioitu N-tyyppin radiotaajuusliitin.

Taajuusvasteen korjausmenetelmää ei tarvitse käyttää, jos kalibrointijärjestelmän taajuusvastevirhe on riittävän pieni. Taajuusvasteen korjausmenetelmää käytettäessä epävarmuudet arvioidaan Monte Carlo-menetelmällä.

Työn keskeinen tulos on paremmin jäljitettävä mittausjärjestelmä staattisen sähköpurkauksen sietokyvyn testauslaitteiden kalibrointiin TTK:n sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratorioissa.

Avainsanat: staattinen sähköpurkaus, kohtioadapteri, jäljitettavuus, epävarmuus, kalibrointi, toistettavuus

## Alkusanat

Diplomityöprojekti toteutettiin Mittatekniikan keskuksen projektirahoituksella Teknillisen korkeakoulun Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratoriossa.

Haluan kiittää kaikkia, joita ilman tämä työ ei olisi onnistunut. Erityiset kiitokset Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratorion henkilökunnalle, joista muutamia mainitakseni työn valvoja prof. Matti Lehtonen, haasteita antanut työn ohjaaja TkT Jari Hällström, TkL Esa-Pekka Suomalainen, TkL Petri Hyvönen, Ins. Veli-Matti Niiranen, DI Yuri Chekurov, Jouni Mäkinen, Hannu Kokkola ja Olli Kara sekä Joni Kluss. Kiitokset Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osaston protopajan Sami Hiltuselle koneistuksista. DI Mika Husso ja DI Viktor Nässi mahdollistivat kohtioadapterin kehittämisen Tietoliikennelaboratoriossa. Erityiset kiitokset Tietoliikennelaboratorion DI Rauno Kytöselle ja Teoreettisen sähkötekniikan laboratorion TkT Kimmo Silvoselle, jotka kumpikin omalla tavallaan johtivat siirtoadmittanssin yhtälön. Diplomityön onnistumisen on mahdollistanut ympäristö, jossa työn tueksi löytyy sähkö- ja tietoliikenteen alojen eri osa-alueiden asiantuntijoita ja laitteita. Kiitokset myös Mittatekniikan keskuksen DI Heikki Koivulalle asiantuntija-avusta, ABB:n DI Jukka Putaansuulle kiinnostuksesta ja Amitra Oy:lle, joka lähetti näytekappaleita kontaktijousista.

Kiitokset Jari Keräselle ja Matti Kuokalle työn lukemisesta ja myönteisestä palautteesta. Kiitokset Tuomo Raitiolle Monte Carlo-menetelmään liittyvästä avusta. Haluan myös kiittää vaimoani Pauliinaa ja koiraamme Ronjaa, vanhempiani sekä muuta lähipiiriä myönteisestä suhtautumisesta.

Espoossa 2007

Matti L. J. Löytty

## Sisällysluettelo

Alkusanat .....	4
1 Johdanto .....	13
1.1 Tavoite .....	14
2 Kehittäminen .....	15
2.1 ESD-standardin nykytilanne .....	15
2.2 ESD-standardin tulevaisuuden näkymiä .....	19
2.3 Referenssijärjestelmän kehitystarpeet .....	20
2.4 ESD-standardin vaatimukset taajuusvasteelle .....	21
2.5 Kalibrointijärjestelmän rakenne .....	22
2.5.1 Kohtion siirtojohdot .....	23
2.5.2 Kohtioadapterin kehittäminen .....	27
2.5.3 Kalibrointijärjestelmän piirikaavio .....	30
3 Mittaukset .....	32
3.1 Laitteisto .....	32
3.1.1 Kohtioadapteri .....	32
3.1.2 Kohtio .....	32
3.1.3 Vaimennin .....	33
3.1.4 Kaapeli .....	34
3.1.5 Maadoituskaapeli ja maadoittaminen .....	35
3.1.6 Oskilloskooppi .....	35
3.1.7 Piirianalysointilaite .....	41
3.1.8 Erikoistyökalut .....	42
3.2 Mittaustilat ja niiden ympäristöolosuhteet .....	43
3.3 Epävarmuustekijät .....	44
3.3.1 Tilastolliset ja ei-tilastolliset epävarmuustekijät .....	45
3.4 Kohtioadapterien mittaukset .....	46
3.4.1 Tasavirtamittaukset .....	46
3.4.2 Taajuusvastemittaukset .....	46
3.5 Kohtioadapterin, kohtion, kaapelin, vaimentimen ja oskilloskoopin mittaukset .....	47
3.5.1 Tasavirtamittaukset .....	48
3.5.2 Kohtion, vaimentimen ja kaapelin kalibrointi .....	49

3.5.3	Oskilloskoopin kalibrointi .....	51
3.6	Epäsuoran sähkömagneettisen kytkeytymisen mittaukset.....	52
4	Laskenta.....	53
4.1	Siirtokonduktanssi $G_{\text{sys}}$ .....	53
4.2	Taajuusvastevirheen korjaus S-parametreilla .....	54
4.2.1	S-parametreista siirtoadmittanssiin $Y_{\text{sys}}$ .....	55
4.2.2	Siirtoadmittanssivasteen $Y_{\text{sys}}(f)$ tarkastaminen .....	57
4.2.3	Virran $i_n(t_n)$ laskenta .....	57
4.3	Epävarmuus .....	58
4.3.1	Epävarmuus ilman taajuusvastevirheen korjausta .....	58
4.3.2	Epävarmuus taajuusvastevirheen korjauksella .....	59
5	Tulokset .....	62
5.1	Verifiointi .....	62
5.2	Referenssijärjestelmän kehittäminen .....	62
5.2.1	Laitteisto .....	62
5.2.2	Siirtokonduktanssi $G_{\text{sys}}$ .....	63
5.2.3	Siirtoadmittanssivaste $Y_{\text{sys}}(f)$ .....	63
5.2.4	Toistettavuus .....	64
5.3	Kalibrointijärjestelmän kalibrointi .....	66
5.3.1	Jäljitettävyyys .....	66
5.3.2	Epävarmuus .....	67
6	Yhteenveto .....	70
6.1	Tavoitteiden toteutuminen .....	70
6.2	Johtopäätökset .....	70
6.3	Tulevaisuus .....	72
	Lähteet .....	74
	Liite A – Siirtoadmittanssi MATLABilla .....	79
	Liite B – Yhtälöitä. ....	80
	Liite C – Kohtioadapterin kehittämisprosessi .....	81
	Liite D – Piirianalysaattorin kalibrointi ja kalibrointirajapinta .....	84
	Liite E – Monte Carlo-menetelmä .....	86

**Kuvat**

<i>Kuva 1.1 – Tyypillinen testauslaitteen kalibrointijärjestely [IEC 1995]</i>	13
<i>Kuva 2.1 – ESD-testauslaitteen tuottaman ulostulovirran malli [IEC 2001]</i>	16
<i>Kuva 2.2 – ESD-testauslaitteen piirikaavio [IEC 2005]</i>	17
<i>Kuva 2.3 – Kohtioiden vertailu [Lin 1998]</i>	18
<i>Kuva 2.4 – ESD-impulssin tehospektri</i>	19
<i>Kuva 2.5 – Jon Barth-kohtion pintaliitosvastusta</i>	22
<i>Kuva 2.6 – ESD-testauslaitteen kalibrointi [Ketelaere 2001]</i>	23
<i>Kuva 2.7 – Kartiosirtojohto [Walt 1998]</i>	24
<i>Kuva 2.8 – Standardiluonnoksen ehdottaman kohtion siirtojohdot [IEC 2005]</i>	25
<i>Kuva 2.9 – N-naarasliittimen (23N50–0–69) mittoja [Huber 1995/2]</i>	25
<i>Kuva 2.10 – Kohtioadapteri kiinnitettynä kohtioon</i>	27
<i>Kuva 2.11 – Kohtioadapterin ja kohtion siirtojohtojen mittojen muutokset.</i>	28
<i>Kuva 2.12 – Vasemmalta: N-uros-kohtioadapteri ja N2R2-kohtioadapteri</i>	29
<i>Kuva 2.13 – Kalibrointijärjestelmän ja kohtioadapterin piirikaavio</i>	30
<i>Kuva 2.14 – Piirianalyysi vaimennuksesta <math>S_{21}</math></i>	31
<i>Kuva 3.1 – Vaimentimen kalibroitu vaimennus <math>S_{21}</math></i>	34
<i>Kuva 3.2 – Kaapelin kalibroitu vaimennus <math>S_{21}</math></i>	35
<i>Kuva 3.3 – Oskilloskoopin sisäisten vaimentimien kytkentä [LeCroy 2003]</i>	38
<i>Kuva 3.4 – Oskilloskoopin etuasteen kytkentäkaavio [LeCroy 2003]</i>	39
<i>Kuva 3.5 – ESD-impulssin huippuarvon mittaaminen 6 GHz:n ja 1 GHz:n taajuuskaistalla. Kuvaan on zoomattu mitatun ESD-impulssin huipun kohdalta otetut näytteet</i>	40
<i>Kuva 3.6 – Referenssijärjestelmän kohtiokorjauksen vaikutus ESD-impulssin huippuarvoon. Vain impulssin huipun kohdalta otetut näytepisteet näkyvät kuvassa.</i>	41
<i>Kuva 3.7 – Tietoliikennelaboratorion ja MIKESin piirianalysointilaitteiden ero kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin <math>S_{21}</math> mittauksessa</i>	42
<i>Kuva 3.8 – Kullattujen kohtioadaptereiden kontaktiresistanssimittaus</i>	43
<i>Kuva 3.9 – Epävarmuustekijät kalanruotodiagrammissa [IEC 2005]</i>	44
<i>Kuva 3.10 – Kohtioadapterit vastakkain <math>S_{21}</math>, mittaus: TLT-laboratorio</i>	46
<i>Kuva 3.11 – Kohtioadapterit vastakkain <math>S_{11}</math>, TLT-laboratorio</i>	47
<i>Kuva 3.12 – Tasavirtamittaus [IEC 2005]</i>	48
<i>Kuva 3.13 – Piirianalysointimittaus. [IEC 2005]</i>	49

<i>Kuva 3.14 – Heijastusvaimennus <math>S_{11}</math> verrattuna laskennalliseen DC-heijastuskertoimeen, MIKES-mittauksessa on käytössä vanhempi versio kohtioadapterista.</i>	50
<i>Kuva 3.15 – Kohtio, vaimennin, kaapeli, kohtioadapterivaihtoehdot: N-uros oikealla, N2 vasemmalla, runko-osa R2 ei ole kuvassa.</i>	50
<i>Kuva 3.16 – Läpimenovaimennuksen <math>S_{21}</math> vaatimukset (lila ja keltainen) ja mittaustuloksia (sininen ja violetti), mittaukset TLT-laboratoriossa.</i>	51
<i>Kuva 4.1 – Siirtokonduktanssin <math>G_{\text{sys}}[S]</math> kuuden kuukauden stabiilisuus</i>	54
<i>Kuva 4.2 – S-parametrien mittauksen piirikaavio [Lu 2005]</i>	55
<i>Kuva 4.3 – S-parametrien käyttäminen kalibrointijärjestelmässä [Vlietinck 2000]</i>	56
<i>Kuva 4.4 – <math>S_{11}</math> viiveen vaikutus siirtoadmittanssivasteeseen <math>Y_{\text{sys}}(f)</math></i>	57
<i>Kuva 4.5 – Epävarmuudet standardirajojen sisällä? [IEC 2005]</i>	60
<i>Kuva 5.1 – Siirtoadmittanssivasteen <math>Y_{\text{sys}}(f)</math> vertailu</i>	64
<i>Kuva 5.2 – Jäljitettävyy skaavio</i>	67
<i>Kuva 5.3 – Epävarmuus skaavio</i>	68
<i>Kuva C.0.1 – Kohtioadapterin prototyyppien rungot 1-7</i>	81
<i>Kuva C.0.2 – Yksinkertainen kohtioadapteri</i>	83
<i>Kuva E.0.1 – Oskilloskoopin jännite</i>	86
<i>Kuva E.0.2 – Siirtoadmittanssivaste <math>Y_{\text{sys}}(f)</math></i>	87
<i>Kuva E.0.3 – Siirtoadmittanssilla korjattu <math>i_n(t_n)</math> ja Monte Carlo-menetelmä</i>	88

## Taulukot

<i>Taulukko 2.1 – ESD-testauslaitteiden parametreja</i>	17
<i>Taulukko 2.2 – Standardiluonnoksen vaatimukset heijastus- ja läpimenovaimennuksille. [IEC 2005]</i>	21
<i>Taulukko 2.3 – Siirtojohtojen ominaisimpedanssit</i>	26
<i>Taulukko 2.4 – Kartiosiiro johdon ominaisimpedanssit [Walt 2000]</i>	26
<i>Taulukko 3.1 – Oskilloskoopin mitta alueet ja offsettasot</i>	37
<i>Taulukko 5.1 – Epävarmuus budjetti</i>	69

## Käsitteet

Mittanormaali                      määrittelee, realisoii tai säilyttää suureen mittayksikön



Kalibrointi	on toimenpide, jossa selvitetään mittausjärjestelmän poikkeama verrattuna mittanormaaleihin.
Referenssijärjestelmä	kalibrointijärjestelmän kehittämisen lähtökohta.
Kalibrointijärjestelmä	on kohtio, vaimennin, kaapeli ja oskilloskooppi toisiinsa kytkettynä. Laajasti käsiteltynä se sisältää komponenttien ja laitteiden lisäksi myös käytettävät ohjelmat, työkalut ja menetelmät.
Verifiointi	on joukko operaatioita, joiden perusteella jonkin asian oikeellisuus voidaan tarkistaa.
Kohtio (target)	ESD-testauslaitteen kalibroinnissa käytettävä purkaukko.
ESD-testauslaite	sähköstaattisia purkauksia tuottava laite
Pistooli (gun)	on ESD-testauslaitteen osa, joka sisältää rinnakkaiskapasitanssin, sarjavastuksen ja kytkimen sekä purkaustyypin mukaisen purkaukärjen.
Kontaktipurkaus	tapahtuu kohtion ja pistoolin kärjen ollessa kontaktissa.
Kohtioadapteri	käytetään kalibrointijärjestelmän kalibroimisessa liityttäessä kohtioon.
Offset	mittalaitteen nollassa poikkeama todellisesta maatasosta.
Liipaisin (trigger)	käynnistää näytteenoton oskilloskoopissa.
Siirtojohto	-mallia käytetään, kun johto missä signaali kulkee ei ole huomattavasti lyhyempi kuin signaalin aallonpituus.
S-parametrit (scattering parameters)	eli sirontaparametrit kertovat mitattavan piirin vaikutuksesta sen portteihin kytkettävään signaaliin.
Tyypin A epävarmuus	käytetään myös nimeä tilastollinen epävarmuus tai satunnainen epävarmuus. Perustuu tuntemattomiin muutoksiin mitattavassa kohteessa tai mittausjärjestelmässä.
Tyypin B epävarmuus	käytetään myös nimeä ei-tilastollinen epävarmuus. Perustuu esimerkiksi mittaajan mittauskokemukseen, kalibrointitodistuksiin ja valmistajan laitetietoihin.

Systemaattinen virhe	tunnettu poikkeama mittaustuloksessa.
Standardiepävarmuus	standardiepävarmuus saadaan tyyppin A ja tyyppin B epävarmuudesta ottamalla neliösummasta neliöjuuri.
Epävarmuus	tarkoittaa työssä samaa, kuin kokonaisepävarmuus tai laajennettu epävarmuus ja se saadaan kertomalla standardiepävarmuus kattavuuskertoimella kaksi ( $k=2$ ) mikä vastaa normaalijakauman luottamuustasoa noin 95%.
Laskennallinen epävarmuus	saadaan osittaisderivoimalla laskettavan suureen yhtälön epävarmuustekijöiden suhteen ja kertomalla osittaisderivaattatermit epävarmuustekijöitä vastaavilla epävarmuuksilla.
Monte Carlo-menetelmä	yhtälön epävarmuustekijöitä kokeillaan satunnaisesti rajojensa sisällä, jolloin nähdään mitkä ovat yhtälön lopputuloksen epävarmuusrajat.

## Lyhenteet

ESD	Staattisen sähköpurkaus (Electrostatic Discharge)
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organisation of Standardization
ANSI	American National Standardization Institute
FFT	Nopea Fourier-muunnos (Fast Fourier Transform)
IFFT	Käänteinen nopea Fourier-muunnos (Inverse Discrete Fourier Transform)
MIKES	Mittatekniikan keskus
TKK	Teknillinen korkeakoulu
TLT	Tietoliikennetekniikan laboratorio
ppm	Miljoonasosa (part per million)
HP	Hewlett Packard
RF	Radiotaajuus (radio frequency)

DC Tasavirta (direct current)

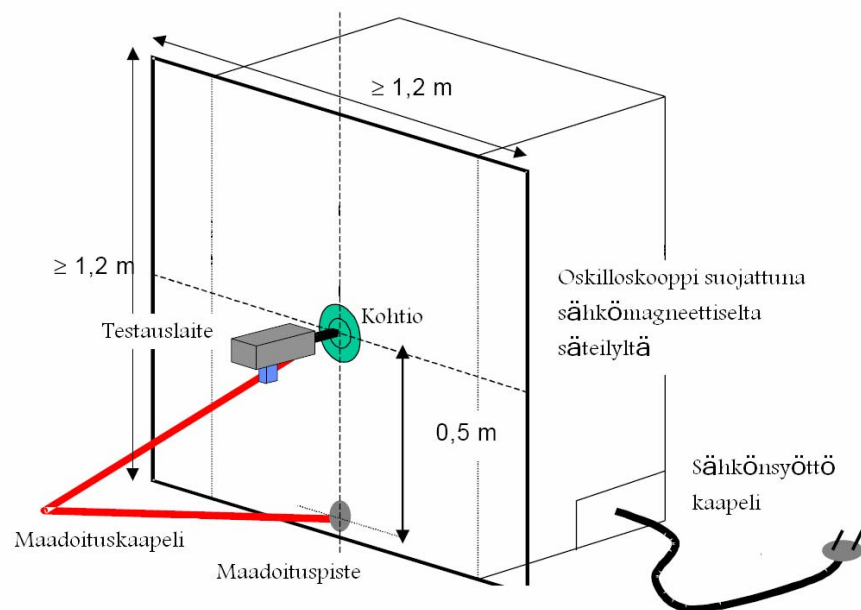
### Symbolit

$I_p$	ESD-impulssin virran huippuarvo. (IEC 61000-4-2, $I_{peak}$ ).
$t_r$	ESD-impulssin virran nousuaika 10% tasosta 90% tasoon. (IEC 61000-4-2, $t_{rise}$ ).
$I_{30}$	ESD-virran arvo 30 nanosekuntin kuluttua impulssin alkamisesta. (IEC 61000-4-2).
$I_{60}$	ESD-virran arvo 60 nanosekuntin kuluttua impulssin alkamisesta. (IEC 61000-4-2).
$W_s$	ESD-virran impulssimuodolle asetettavat rajat. (IEC 61000-4-2:draft 2005).
$R_c$	Latausresistanssi. ( $R_{charge}$ ).
$R_d$	Purkausresistanssi ( $R_{discharge}$ ).
$C_d$	Purkauskapasitanssi ( $C_{discharge}$ ).
$C_s$	Testauslaitteen ympäristön ( $C_{surroundings}$ ) aiheuttama kapasitanssi.
$S_{11}$	Rajapintaan 1 saapuvan jänniteaallon suhde samalta rajapinnalta palaavaan jänniteaaltoon.
$S_{21}$	Rajapintaan 1 saapuvan jänniteaallon suhde rajapinnalta 2 palaavaan jänniteaaltoon.
$R_{sys}$	Siirtoresistanssi on ulostulevan tasajännitteen ja sisäänmenevän tasavirran suhde.
$G_{sys}$	Siirtokonduktanssi, on siirtoresistanssin käänteisluku.
$Y_{sys}$	Siirtoadmittanssi on sisäänmenevän virran ja ulostulevan jännitteen suhde, taajuusriippuva.
$Z_{sys}$	Siirtoimpedanssi on siirtoadmittanssin käänteisluku.
$I_{sys}$	Kohtioon syötettävä virta.
$Z_{50}$	Oskilloskoopin impedanssi.
$U_{50}$	Tasajännite oskilloskoopin mittauskanavan liittimessä.
$u_n$	Oskilloskoopin mittaama jännitte näytepisteessä $n$ .

$t_n$	Oskilloskoopin mittaamaa jännitettä $u_n$ näytepisteessä $n$ vastaava aika.
$U_n$	Oskilloskoopin jännite $u_n$ taajuusalueeseen muutettuna.
$i_n$	ESD-impulssin virta näytepisteessä $n$ .
$\lambda$	Aallonpituus.
$l$	Siirtojohdon pituus.
$f$	Taajuus.
$\varepsilon_r$	Suhteellinen permittiivisyys.
$\eta$	Tyhjiön aaltoimpedanssi.
$Z_0$	Aaltoimpedanssi, ominaisimpedanssi.
$c$	Valonnopeus.
$v_R$	Aallon nopeus väliaineessa.

# 1 Johdanto

Staattisen sähköpurkauksen (ESD) tuottava ESD-testauslaite sisältää pistoolin, jolla ESD-impulssi kohdistetaan testikohteeseen ESD-sietokyvyn testauksessa. ESD-testauslaitetta kalibroitaessa pistoolin kontaktikärki kohdistetaan virtakohtioon (current target), joka on kiinnitetty maadoitettuun metalliseinään (Kuva 1.1). Metalliseinän takana on jännitettä mittaava oskilloskooppi. Oskilloskooppi on tarvittaessa erillisessä metallisessa kotelossa. Metallinen kotelo estää sähkömagneettisen säteilyn aiheuttaman häiriön jännitemittaukseen, jos metalliseinän muodostama sähkömagneettinen suojaus ei ole riittävä.



Kuva 1.1 – Tyypillinen testauslaitteen kalibrointijärjestely [IEC 1995]

Ihminen varautuu herkästi useamman kV:n jännitteeseen. Varauksen purkautuessa saattaa purkaukohde vaurioitua tai jopa tuhoutua. Suuret virtapiikit voivat esimerkiksi sulattaa puolijohteiden ohuet metalloinnit tai vioittaa pysyvästi puolijohteiden pn-liitoksia [Hahtela 2000]. Tällaisista syistä ESD-testauslaitteiden tuottamilla purkauksilla testataan komponentteja, laitteita tai järjestelmäkokonaisuuksia ja näin selvitetään niiden ESD-sietokyky. Jos ESD-sietokyky

testit halutaan tehdä IEC-standardin vaatimukset täyttävästi ja vertailukelpoisesti, pitää ESD-testauslaite kalibroida IEC-standardin 61000-4-2 mukaisesti.

## **1.1 Tavoite**

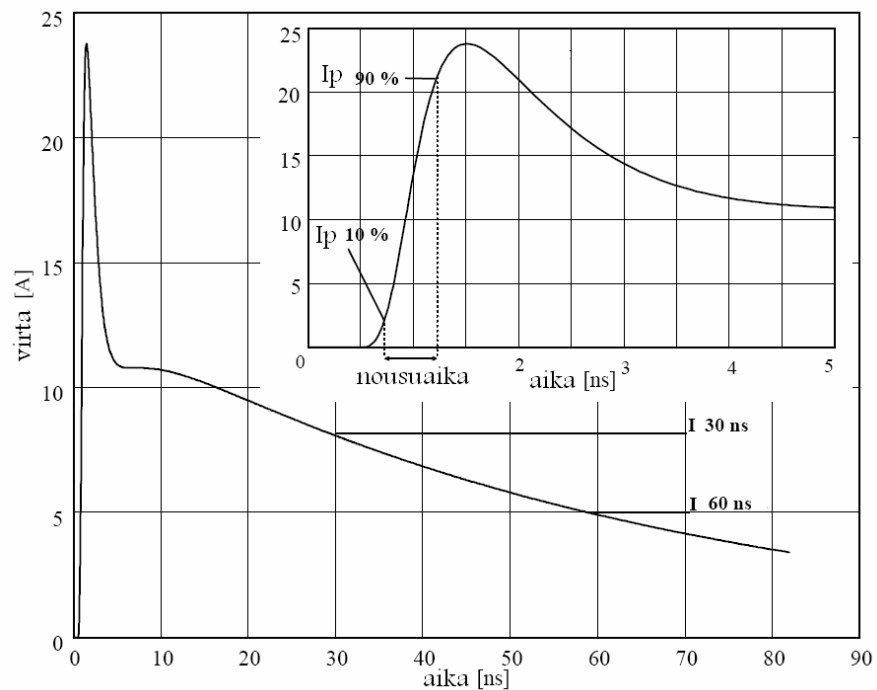
Tämän työn ensimmäinen tavoite oli TKK:n olemassa olevan ESD-sietokyvyn testauslaitteiden kalibrointijärjestelmän (referenssimittausjärjestelmä) kehittäminen ja verifiointi. Koska järjestelmässä on uusi oskilloskooppi, ei pelkkä verifiointi riittänyt vaan kalibrointijärjestelmä piti kalibroida. Kalibroidulla kalibrointijärjestelmällä pystytään kalibroimaan kansainvälisesti vertailukelpoinen ESD-sietokyvyn testauslaite. Toinen tavoite oli kehittää yksinkertaisia ja siten käytännöllisiä menetelmiä kalibrointilaboratorioon sekä dokumentoida työn tulokset huolellisesti.

## 2 Kehittäminen

Tässä luvussa käsitellään kalibrointijärjestelmän kehittämiseksi asetettavia vaatimuksia ja työn lähtökohtia (luvut 2.1, 2.2, 2.3). Lisäksi kehittämisen tueksi kalibrointijärjestelmästä muodostetaan siirtojohtojen ominaisimpedansseja  $Z_0$  ja pituuksia  $l$ , resistansseja  $R$  sisältävä piirikaavio (luku 2.5.3), joka verifioidaan piirianalyysillä. Laskettujen siirtojohtojen ominaisimpedanssien avulla kehitetään kohtioadapteria, jota tarvitaan kalibrointijärjestelmän taajuusvasteen mittauksessa.

### 2.1 ESD-standardin nykytilanne

Staattisen sähköpurkauksen impulssissa esiintyy suuria (esimerkiksi 30 A) lyhytaikaisia (esimerkiksi alle 60 ns) virtoja (Kuva 2.1). Autoteollisuudessa suurimpien impulssien latausjännitteen huippuarvot ovat  $\pm 25$  kV, koska autojen suuri kapasitanssi mahdollistaa suuren varauksen ja sitä kautta suuren ESD-purkauksen [ISO 2001]. Tässä työssä tutkittava kalibrointijärjestelmä on suunniteltu erityisesti IEC-standardin 61000-4-2:1995 [IEC 1995] kontaktipurkauksen jännitetasoille, joita ovat  $\pm 8$  kV,  $\pm 6$  kV,  $\pm 4$  kV,  $\pm 2$  kV.

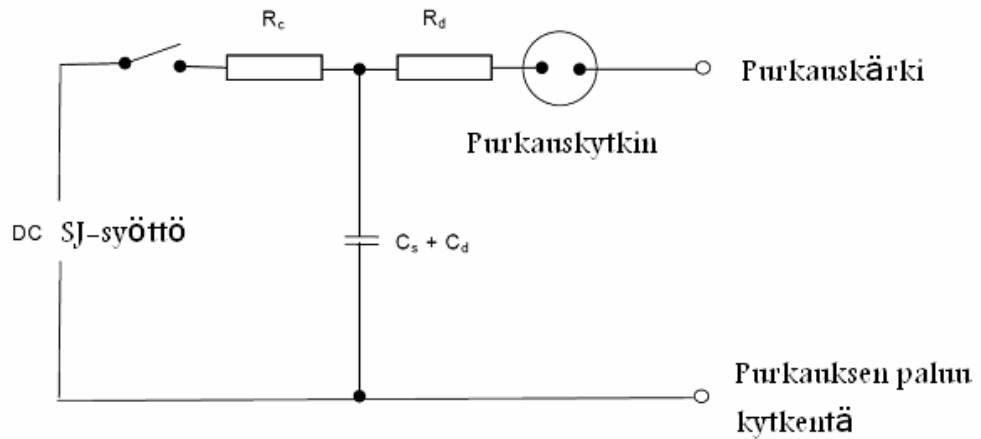


Kuva 2.1 – ESD-testauslaitteen tuottaman ulostulovirran malli [IEC 2001]

Työn lähteissä staattisen sähköpurkauksen nousuajaksi  $t_r$  on esitetty noin 0,2 ns – 1 ns [IEC 1995][Stroka 2003][Stroka]. Nousuaika lasketaan hetkestä, jolloin virta on 10% huippuvirrasta  $I_p$  hetkeen, jolloin virta on 90% huippuvirrasta  $I_p$  (Kuva 2.1). Standardissa [IEC 1995] on ESD-sietokyvyn testauslaitteelle vaatimukset paitsi nousuajalle  $t_r$  ja huippuarvolle  $I_p$ , myös virralle  $I_{30}$  hetkellä 30 ns ja virralle  $I_{60}$  hetkellä 60 ns.

ESD-testauslaitteen piirikaaviossa (Kuva 2.2) latausresistanssi  $R_c$ , purkausresistanssi  $R_d$ , purkauskapasitanssi  $C_d$  ja ympäristön kapasitanssi  $C_s$  ovat eri standardeissa erilaisia (Taulukko 2.1). ESD-testauslaitteiden tuottamat impulssit ovat hyvin erilaisia johtuen erilaisista komponenteista. Myös muiden kuin IEC-standardin mukaisia ESD-testauslaitteita voidaan kalibroida työssä kehitettävillä menetelmillä. Sopivuus erilaisiin ESD-testauslaitteisiin kannattaa tarkistaa, jotta kalibrointijärjestelmä ei vahingoitu.





Kuva 2.2 – ESD-testauslaitteen piirikaavio [IEC 2005]

Taulukko 2.1 – ESD-testauslaitteiden parametreja

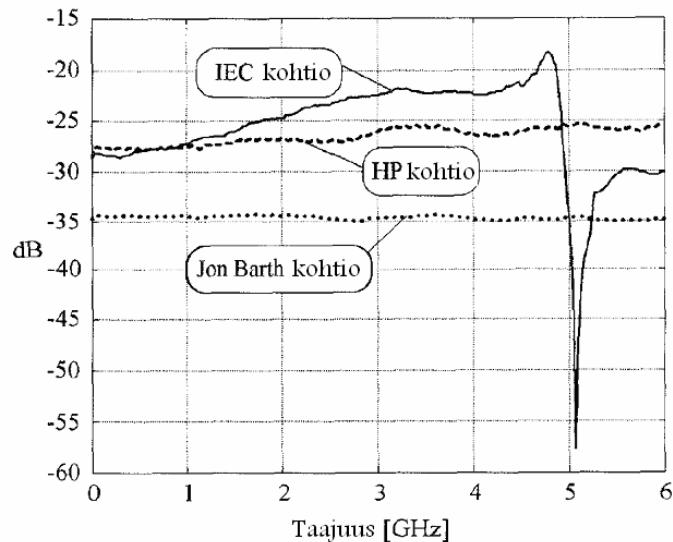
	$R_c$ [M $\Omega$ ]	$R_d$ [ $\Omega$ ]	$(C_d + C_s)$ [pF]
[IEC 1995]	50 – 100	$330 \pm 10\%$	$150 \pm 10\%$
[IEC 2005]	suositus	suositus	suositus
[ISO 2001]		$2000 \pm 10\%$	$150 \pm 10\%$ , $330 \pm 10\%$
[ANSI 1993]	10-1000	330, 15, 75	150

Standardin [IEC 1995] vaatimuksien toteutumisen lisäksi ESD-sietokyvyn testauslaitteiden kalibrointijärjestelmässä pyrittiin huomioimaan standardin päivittämistä ehdottavat IEC-standardiluonnokset. Standardin [IEC 1995] ongelmia on käsitelty esimerkiksi lähteissä [Glättli 1996][Hyatt 1993][Stroka]. Ongelmia aiheuttavat kalibrointijärjestelmän kaistanleveys verrattuna ESD-pulssin tarvitsemaan kaistaan. Seuraavassa esitetään ongelmat 1-3.

#### Ongelma 1, kohtion rakenne

Standardissa [IEC 1995] esitetty kohtiorakenne aiheuttaa mitattavaan impulssiin merkittäviä muutoksia yli 1 GHz:n taajuuksilla. Koska IEC-standardin mukaisen ESD-testauslaitteen impulssi kuitenkin sisältää yli 1 GHz:n taajuuksia (Kuva 2.4), ei IEC-kohtio ole yhtä käyttökelpoinen kuin esimerkiksi kuvassa Jon Barth-kohtio tai HP-kohtio (kuva 2.3) [Stroka 2003]. Tulevaisuudessa kohtion taajuusvasteen

pitäisi olla tasaisempi kuin standardin [IEC 1995] esittämällä IEC-kohtiolla. [IEC 2005][IEC 2007]



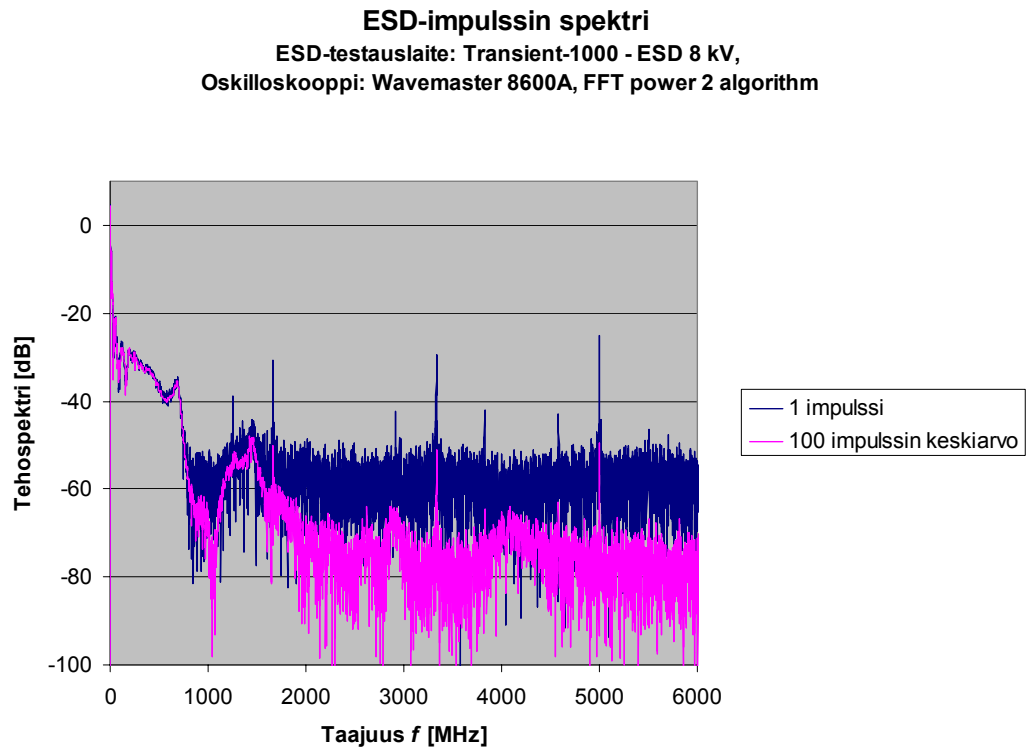
Kuva 2.3 – Kohtioiden vertailu [Lin 1998]

Tässä työssä tutkittavassa kalibrointijärjestelmässä on HP:n toimittama prototyyppi-kohtio. Kalibrointiraportin ja kalibrointijärjestelmän mittausten (luku 3) perusteella se on Jon Barth-kohtio [Pommerenke 2000]. Kohtion taajuusvasteen aiheuttama virhe ESD-impulssin mittaukseen on pienempi kuin voimassaolevassa standardissa [IEC 1995] esitettävässä IEC-kohtiossa. Kalibrointijärjestelmässä käytettävä kohtio ei vastaa myöskään valmisteilla olevan uuden standardin luonnoksen [IEC 2005] suosittamaa kohtiota. Poikkeamia ovat ainakin 1) keskijohtimen rakenne ja 2) N-liittimen käyttäminen ennen vaimenninta. Vuoden 2005 standardiluonnoksessa ehdotetaan SMA-liitintä [IEC 2005].

## Ongelma 2, oskilloskoopin taajuuskaista

Standardissa oskilloskoopin taajuuskaistavaatimus on 1 GHz, joka on pieni verrattuna ESD-impulssin nopeuteen [IEC 1995]. Tämä voidaan nähdä IEC-standardin perusteella rakennetun Transient-1000 ESD-testauslaitteen [EMC-Partner 1997] impulssin taajuusvasteesta (Kuva 2.4). Kuvassa on esitetty sekä yhden impulssin spektri että sadan impulssin spektrien keskiarvo. ESD-

impulssissa merkittäviä taajuuksia esiintyy 1 GHz:n taajuuskaistalla ja jossain määrin merkittäviä 1-2 GHz:n taajuuskaistalla saakka. Tämä on varmasti yksi syy, miksi vuoden 2005 standardiluonnoksessa ehdotetaan, että oskilloskoopin taajuuskaistan pitäisi olla vähintään 2 GHz [IEC 2005].



Kuva 2.4 – ESD-impulssin tehospektri

Ongelma 3, standardipulssin nousuaika  $t_r$  on suurempi kuin todellisten purkausten

Standardin [IEC 1995] mukaisen ESD-impulssin nousuaika  $t_r$  on 0,7 – 1 ns, kun tyypillinen ihmisen aiheuttama ESD-impulssi on nopeampi [Stroka]. Tämä ei ole merkittävä ongelma vuoden 2007 standardiluonnoksessa, koska nousuaika-alueen vaatimus ei ole muuttunut alle 0,7 nanosekuntin [IEC 2007].

## 2.2 ESD-standardin tulevaisuuden näkymiä

Vuoden 1995 ESD-standardiin [IEC 1995] on tehty useita standardiluonnoksia. Standardiluonnoksien perusteina ovat olleet muun muassa edellämainittujen

ongelmien korjaaminen. Yksi hidaste standardin uudistumiselle ovat uudistuksesta aiheutuvat järjestelmäpäivitykset ja niiden kustannukset vanhan standardin mukaisille kalibrointilaboratorioille. Toinen hidaste on standardien muuttamiseen liittyvä byrokratia. Standardien päivitys on parhaillaan työn alla, ja tässä työssä on pyritty huomioimaan standardin luonnokset ja lisäykset. Kalibrointijärjestelmä on tällöin luotettavammin myös uudistettavan standardin vaatimukset täyttävä. Standardiin on tehty lisäyksiä [IEC 2000][IEC 1998] ja standardin luonnoksia [IEC 2007][IEC 2005][IEC 2002/1][IEC 2001] sekä näitä luonnoksia on kommentoitu kansainvälisesti [IEC 2006][IEC 2002/2]. Nämä dokumentit antavat erilaisia lähestymistapoja ESD-testauslaitteen kalibrointijärjestelmän kehittämiseen. Muut standardit, kuten autoteollisuudessa käytettävän ISO standardi [ISO 2001] ja ANSI standardi [ANSI 1993] antavat erilaisen näkökulman kalibrointijärjestelmän kehittämiseen.

## 2.3 Referenssijärjestelmän kehitystarpeet

Lähtökohta työlle on ESD-sietokyvyn testauslaitteen kalibrointiin kehitetyn referenssijärjestelmän [Piironen 2004][Piironen 2003][Piironen 2001] kalibrointi, koska referenssijärjestelmän laitteistoa on päivitetty nopeammalla oskilloskoopilla.

Referenssijärjestelmässä keskeisin systemaattisen virheen aiheuttaja on referenssijärjestelmän taajuusvaste [Piironen 2004]. Tätä systemaattista virhettä yritetään korjata referenssijärjestelmässä konvolvoimalla FFT-muunnettu oskilloskoopilta mitattu jännite kalibrointijärjestelmän taajuusvasteella. Aiempi taajuusvastekorjaus perustuu tasavirralla mitattuun jakosuhteeseen ja vaimentimen sekä kohtion taajuusvastemittauksiin erillisinä, jolloin kaapelin ja komponenttien rajapintojen vaikutusta ei huomioida. Tässä työssä, referenssijärjestelmästä poiketen, mitataan kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvaste komponenttien ollessa toisiinsa kytkettyinä. Tämän jälkeen kalibrointijärjestelmän taajuusvastemittauksista laskettava korjauskerroin on luotettavampi sisältäen

myös komponenttien rajapinnat, kaapelin ja kohtion voimassa olevan kalibroinnin.

Taajuusvastemittaus ei olemassa olevalla laitteistolla ole mahdollista, joten työssä kehitettiin kohtioadapteri (luku 2.5.2) taajuusvasteen mittaamiseen.

## 2.4 ESD-standardin vaatimukset taajuusvasteelle

Vuoden 2005 standardiluonnoksen perusteella ESD-testauslaitteiden kalibrointijärjestelmän taajuusvastevirheen pitää olla riittävän pieni [IEC 2005]. Kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvastevirheen suuruus mitataan piirianalysaattorilla. Taajuusvastevaatimukset ovat esitetty taulukossa 2.2. Heijastusvaimennus  $S_{11}$  kuvaa kohtioon saapuvan jänniteaallon heijastumisen suuruutta kohtion pinnasta. Läpimenovaimennus  $S_{21}$  kuvaa kohtion pintaan saapuneen jänniteaallon suuruuden suhdetta oskilloskoopin mittausliittimien jänniteaaltoon.

*Taulukko 2.2 – Standardiluonnoksen vaatimukset heijastus- ja läpimenovaimennuksille. [IEC 2005]*

[IEC 2005]	Taajuus $f \leq 1$ GHz		Taajuus $f \leq 4$ GHz	
Vaatimukset	$S_{11}$ [dB]	$S_{21}$ [dB]	$S_{11}$ [dB]	$S_{21}$ [dB]
Kohtio				
Vaimennin	$-0,68 \pm 0,04$	$\pm 0,3$	$-0,68 \pm 0,04$	$\pm 1$
Kaapeli				
Kohtioadapterit	$< -30$ dB	$> -0,3$ dB	$< -20$ dB	$> -0,3$ dB

Kohtion, vaimentimen ja kaapelin heijastusvaimennus  $S_{11}$  on laskettu kohtion resistanssista  $R_K$  (yhtälö 2.1) [IEC 1995] ja kohtioadapterin ominaisimpedanssivaatimuksesta  $50\Omega \pm 2\%$  [IEC 2005]. Kohtion resistanssin epävarmuus perustuu vastuksen tasavirtaresistanssiin ja sen toleranssivaatimukseen. Laskennallinen heijastusvaimennus  $S_{11}$  on käyttökelpoinen vertailuarvo RF-mittauksiin.

$$R_K = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_{25}}} = \frac{1}{\frac{25}{51\Omega \pm 5\%}} = \frac{51\Omega \pm 5\%}{25} = 2,04\Omega \pm 2,5\% \quad (2.1)$$

Standardissa [IEC 1995] on ehdotettu, että kohtiossa on 25 vastusta, jotka ovat resistanssiltaan  $51\Omega \pm 5\%$ . Jon Barth-kohtiossa on rinnakkain 25 pintaliitosvastusta (Kuva 2.5). Vastuksien mitattu rinnakkainen resistanssi on  $(2,043 \pm 0,005)\Omega$ .



Kuva 2.5 – Jon Barth-kohtion 25 pintaliitosvastusta

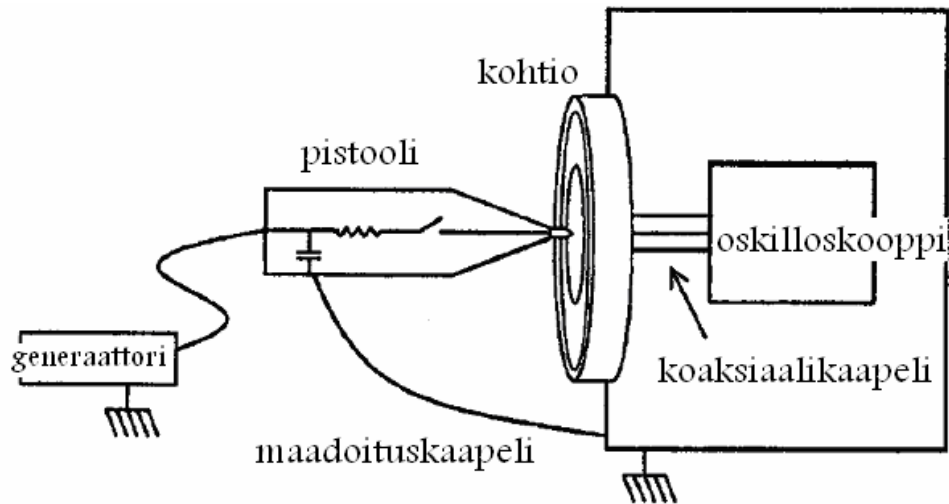
Kun tunnetaan kohtion jälkeisen siirtojohdon ominaisimpedanssi  $Z_0=50\ \Omega$  voidaan laskea heijastuskerroin  $\rho$  (yhtälö 2.2, [Lehto 1999]). Heijastuskertoimen  $\rho$  desibeleinä on noin  $-0,68 \pm 0,04\ \text{dB}$ , jota käytetään heijastuksen  $S_{11}$  vertailuarvona mittauksissa (luku 3.5.2). Epävarmuus on laskettu GUM Workbench-ohjelmalla.

$$\rho = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} = \frac{50 \pm 2\% - \frac{2,04 \pm 2,5\% \cdot 50}{2,04 \pm 2,5\% + 50}}{50 \pm 2\% + \frac{2,04 \pm 2,5\% \cdot 50}{2,04 \pm 2,5\% + 50}} \approx 0,925 \pm 0,41\% \quad (2.2)$$

## 2.5 Kalibrointijärjestelmän rakenne

Kalibrointijärjestelmän keskeiset komponentit ovat ESD-kohtio (Jon Barth), vaimennin, kaapeli, maadoituskaapeli, ja oskilloskooppi (Kuva 2.6).

Kalibrointijärjestelmän ja kalibroitavan ESD-testauslaitteen kytkentä sisältää varausjännitteen tuottavan suurjännitegeneraattorin ja pistoolin (purkauskapasitanssi  $C_d$  ja purkausresistanssi  $R_d$  sekä kytkin).



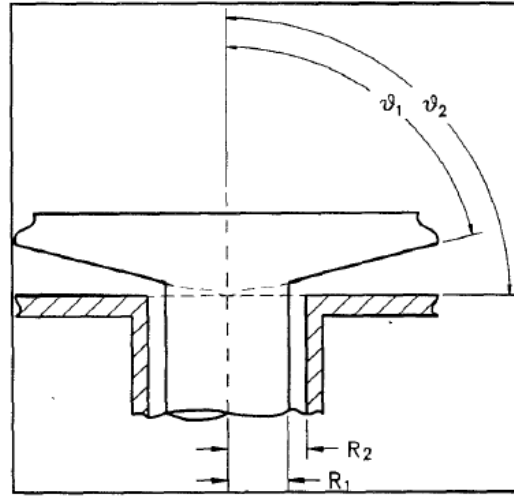
Kuva 2.6 – ESD-testauslaitteen kalibrointi [Ketelaere 2001]

Tässä luvussa laskettavia kohtion siirtojohtojen (luku 2.5.1) mittoja ja niistä seuraavia ominaisimpedansseja käytetään kohtioadapterin kehittämisessä (luku 2.5.2) ja kalibrointijärjestelmän piirikaaviossa (luku 2.5.3).

### 2.5.1 Kohtion siirtojohdot

Kalibrointijärjestelmässä siirtojohtojen ominaisimpedanssimuutokset aiheuttavat RF-heijastuksia. Siirtojohtojen ominaisimpedanssien laskemisen avulla kehitetään kohtioadapteria. Siirtojohtojen avulla muodostetaan kalibrointijärjestelmän piirikaavio. Piirikaavioille tehdään piirianalyysi. Joitain piirikaavion arvoja käytetään mittauksissa (luku 3) ja laskennassa (luku 4).

On suositeltavaa, että ESD-kohtio sisältävää kartiomaisen eli taperoidun tai suipennetun [Lehto 2006] siirtojohdon [IEC 1995]. Kuvassa 4.3 on esitetty kartiomaisen siirtojohdon säteet  $R_1$  ja  $R_2$  sekä kulmat  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , joiden perusteella voidaan laskea kartiosiiirtojohdon ominaisimpedanssi  $Z_0$ .



Kuva 2.7 – Kartiosiiirtojohto [Walt 1998]

Koaksiaalisen siirtojohdon ominaisimpedanssin  $Z_0$  laskeminen on esitetty yhtälössä 2.3 [Lehto 1999] ja vastaavan kartiomaisen yhtälössä 2.4 [Farr 2000].

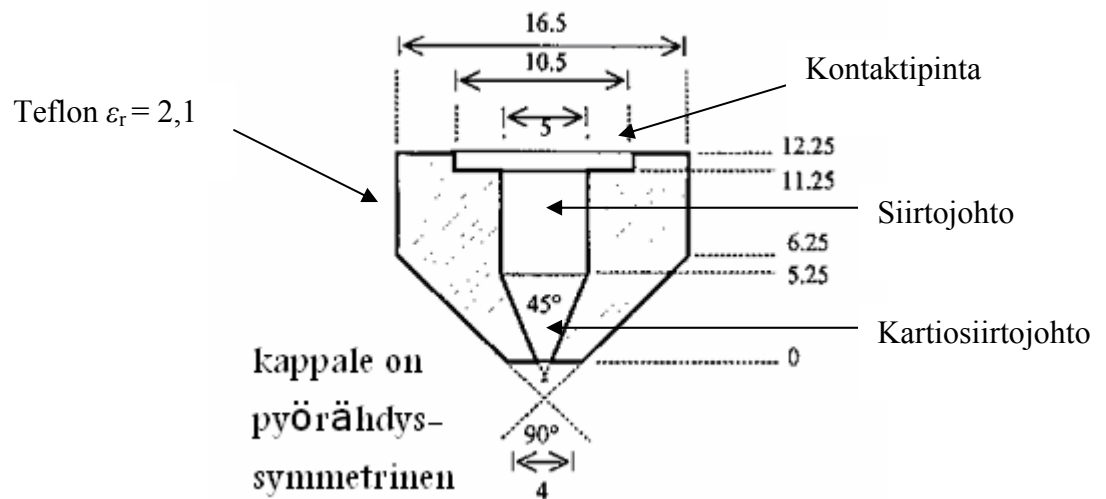
$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (2.3)$$

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right) \quad (2.4)$$

Yhtälöissä 2.3 ja 2.4 tekijä  $\eta$  on tyhjiön aaltoimpedanssi,  $\epsilon_r$  on eristeaineen permittiivisyys. Yhtälössä 2.3  $r_o$  on säde koaksiaalijohdon keskispisteestä eristeaineen ulkopintaan,  $r_i$  on säde koaksiaalijohdon keskispisteestä keskijohtimen ulkopintaan. Yhtälössä 2.4 kulmat  $\theta_2$  ja  $\theta_1$  ovat vastaavat kuin kulmat  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  (Kuva 2.6).

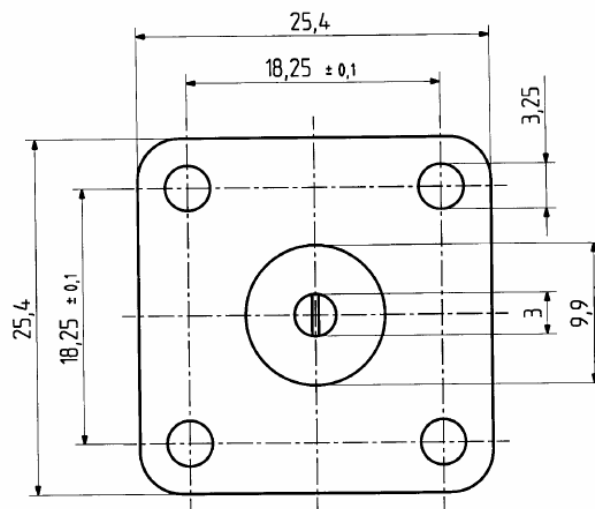
Vuoden 2005 standardiluonnoksen [IEC 2005] ehdottaman ESD-kohtion sisältämän kartiosiiirtojohdon kulmat ovat  $45^\circ$  ja  $90^\circ$ . Näiden kulmien puolikkaita käytetään yhtälössä 2.4. Kohtiossa eristeaineena on teflonia, jonka  $\epsilon_r$  on noin 2,1 [Lehto 1998]. (Kuva 2.8)





Kuva 2.8 – Standardiluonnoksen ehdottaman kohtion siirtojohdot [IEC 2005]

Jon Barth-kohtiossa käytetään N-tyyppin radiotaajuusliitintä, jossa eristeaineena on teflon, kuten kohtiossakin (Kuva 2.9).



Kuva 2.9 – N-naarasliittimen (23N50-0-69) mittoja [Huber 1995/2]

Sijoittaessamme koaksiaalisen siirtojohdon yhtälöön 2.3 Jon Barth-kohtion mittoja ja kuvien (Kuva 2.8 ja Kuva 2.9) mittoja saadaan ominaisimpedanssit  $Z_0$ . (Taulukko 2.3)

Taulukko 2.3 – Siirtojohtojen ominaisimpedanssit

	Jon Barth		IEC-61000-4-2 luonnos				N-naarasliitin	
	Kohtio		Kohtio					
$r_o$ [mm]	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	4.95	4.95
$r_i$ [mm]	3.5	3.5	5.25	5.25	2.5	2.5	1.5	1.5
$\epsilon_r$	2.1	1	2.1	1	2.1	1	2.1	1
$Z_0$ [ $\Omega$ ]	35.48	51.4	18.7	27.1	49.4	71.6	49.4	71.59

Jon Barth-kohtion kontaktipinnan ominaisimpedanssi  $Z_0$  on noin 36  $\Omega$ .

Liittytessä ilmaeristeisellä kohtioadapterilla Jon Barth-kohtioon kontaktipinnan säteillä 8,25 mm ja 3,5 mm, siirtojohtojen ominaisimpedanssi  $Z_0$  on 50  $\Omega$ . Vastaavan IEC-standardiluonnoksen [IEC 2005] kohtion kontaktipinnan ominaisimpedanssi  $Z_0$  on ilmaeristeisenä noin 30 $\Omega$ . Luonnoksen [IEC 2005] ehdottaman kohtion kontaktipinnan jälkeisen tasapaksun siirtojohtojen (Kuva 2.8) säteet ovat 8,25 mm ja 5,25 mm. Tällöin ominaisimpedanssi ilmaeristeisenä olisi noin 72 $\Omega$ . N-naarasliittimen ominaisimpedanssi on 50  $\Omega$ , mutta vastaavilla mitoilla ilmaeristeisenä saadaan noin 72 $\Omega$ . (Taulukko 2.3) Vuoden 2007 standardiluonnoksen perusteella kohtioon tulisi liittyä sellaisella kohtioadapterilla, jolla on sama ominaisimpedanssi  $Z_0$  kuin kohtion kontaktipinnalla [IEC 2007].

Sijoittaessamme yhtälöön 2.4 vuoden 2005 standardiluonnoksen kohtion [IEC 2005] kartiosiiirtojohtojen kulmat joko ilma- tai tefloneristeisenä, saadaan seuraavat ominaisimpedanssit  $Z_0$ . (Taulukko 2.4)

Taulukko 2.4 – Kartiosiiirtojohtojen ominaisimpedanssit [Walt 2000]

$\theta_2$ [°]	45	45
$\theta_1$ [°]	22.5	22.5
$\epsilon_r$	2.1	1
$Z_0$ [ $\Omega$ ]	36.5	52.85

Jos Jon Barth-kohtio olisi tehty ilmaeristeisenä, sen kartiosiiirtojohtojen ominaisimpedanssi  $Z_0$  olisi noin 53  $\Omega$  eli lähellä 50  $\Omega$ . Esimerkiksi näillä mitoilla

voitaisiin tehdä noin  $50\ \Omega$  ilmaeristeinen kartiomainen kohtioadapteri, jota suositellaan vuoden 2007 standardiluonnoksessa [IEC 2007].

Miksi Jon Barth-kohtio on suunniteltu siten, että sen kontaktipinnan ja kartiosiiirtojohdon  $Z_0$  on noin  $35\ \Omega$ ? Yksi selitys voisi olla maksimikentänvoimakkuus. Maksimikentänvoimakkuus ilmaeristeisellä koaksiaalijohdolla saavutetaan, kun sen ominaisimpedanssi on noin  $30\ \Omega$  [Lindell 1997].

### 2.5.2 Kohtioadapterin kehittäminen

Kohtioadapteri (Kuva 2.10) tarvitaan, jotta kohtioon voidaan liittyä piirianalysaattorilla. Tällöin kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvaste voidaan mitata. Lisäksi kohtioadapterin kontaktiresistanssi- ja tasavirtamittaukset voidaan tehdä toistettavammin, koska ei tarvitse käyttää erillisiä kontaktikärkiä kontaktipintaan liityttäessä. Liitteessä kuvataan lyhyesti kohtioadapterin kehittämisprosessi mahdollisen lisäkehityksen avuksi (Liite C – Kohtioadapterin kehittämisprosessi).

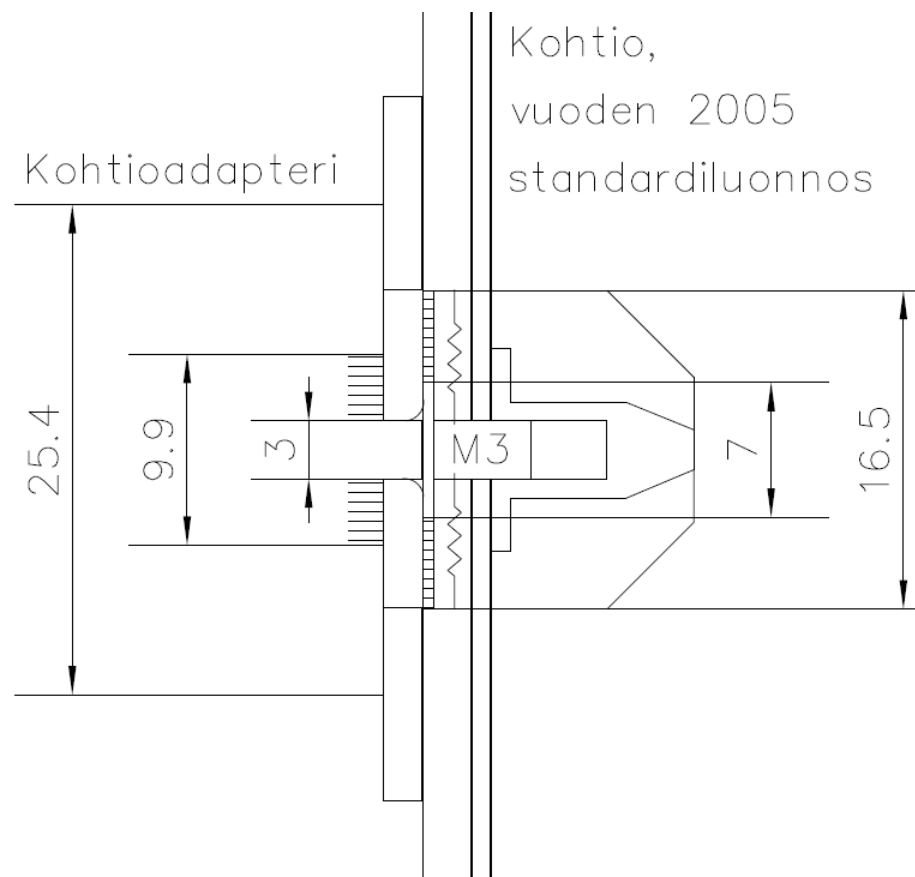


*Kuva 2.10 – Kohtioadapteri kiinnitettynä kohtioon*

Kohtioadapterissa käytettävän N-liittimen taajuuskaista on noin 11 GHz [Huber 1995/1]. N-liitintä käytetään, koska se on taajuuskaistaltaan riittävä ja mitoiltaan lähempänä kohtion kontaktipinnan mittoja kuin vastaava SMA-liitin. Jon Barth-kohtion kontaktipinnan ympärillä olevat 8 kierteistä ruuvien reikää vastaavat  $50\ \Omega$ :n

N-liittimessä olevien neljän kiinnitysreiän mitoitus. Kohtioon voidaan kiinnittää 50Ω:n N-liitin suoraan. 50Ω:n N-liittimeen perustuvan kohtioadapterin kiinnittäminen onnistuu kohtion ja ESD-seinän kiinnitykseen koskematta.

Siirtojohdon mittojen muutokset (Kuva 2.11), kuten sisäjohtimen ja ulkojohtimen leveyksien jyrkät muutokset sekä eristeaineiden muutokset, aiheuttavat korkeilla taajuuksilla heijastuksia. Kuva 2.11 kohtio perustuu vuoden 2005 standardiluonnoksen kohtioon eikä vastaa täysin Jon Barth-kohtiota [IEC 2005].

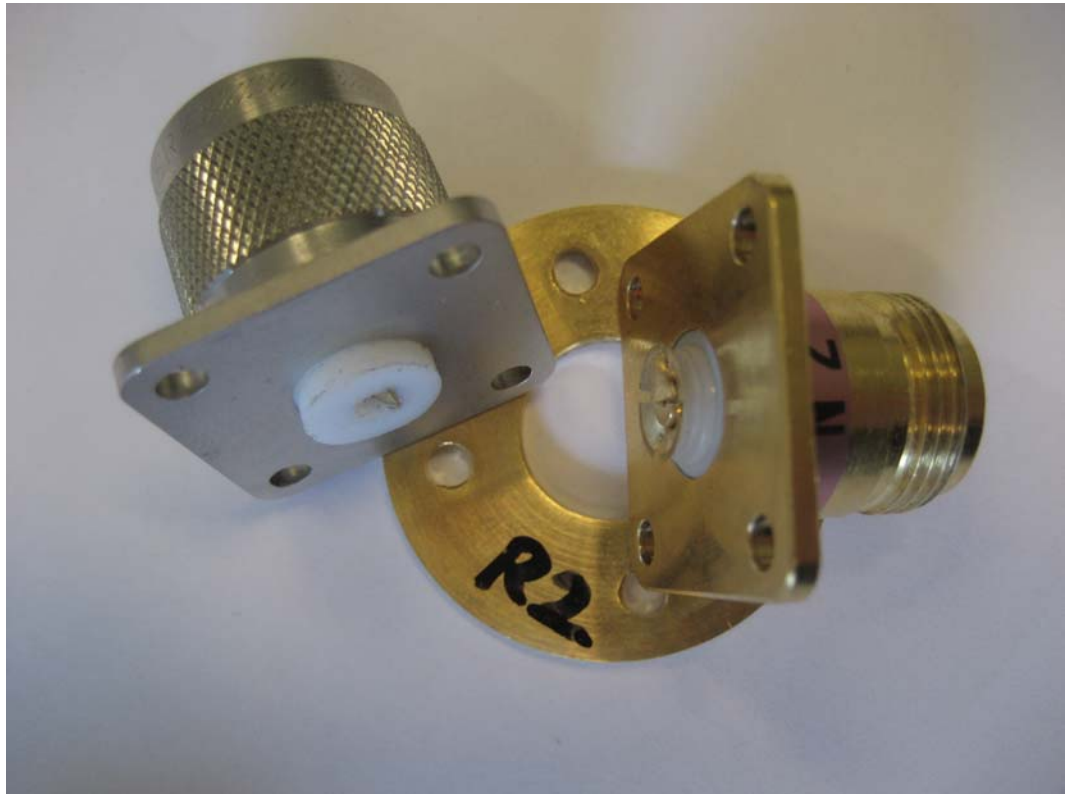


Kuva 2.11 – Kohtioadapterin ja kohtion siirtojohtojen mittojen muutokset.

Kontaktipinnassa siirtojohto levenee, johtuen kohtion rakenteesta ja toisaalta kontaktijousen levenemisestä. Kontaktijousen (pienet kaaret 3 mm johtojen välissä, Kuva 2.11) leveneminen mahdollistaa rinnakkaisen kontaktipinnan kasvattamisen, joka pienentää kontaktiresistanssia ja -induktanssia. Kartiomainen leveneminen estää siirtojohdon jyrkän muutoksen. Heijastuksia ei teoriassa

tapahdu, kun siirtojohto on riittävän lyhyt aallonpituuteen nähden. Käytännössä myös siirtojohtojen fyysisten mittojen ja ominaisimpedanssien sovittaminen on hyödyllistä. Ominaisimpedanssimuutokset muun muassa aiheuttavat rinnakkaiskapasitanssia, joka vaikuttaa lyhyilläkin siirtojohdoilla RF-taajuuksilla [Kytönen 2007].

Kohtioadapterin kehittämisprosessin tuloksia ovat RF-jousen valmistustekniikka ja erilaisia kohtioadapteriversioita. Kehittämisprosessin lähtökohtana on ollut siirtojohdon lyhyys. N-uros-kohtioadapteri on, kohtion, vaimentimen ja kaapelin mittauksessa, taajuusvasteeltaan litteä (luku 3.5.2). Kullattu N2R2 (Kuva 2.12) on N-uros-kohtioadapteria joustavampi ja jousi on kartiomainen, kuten vuoden 2007 standardiluonnoksessa ehdotetaan [IEC 2007].

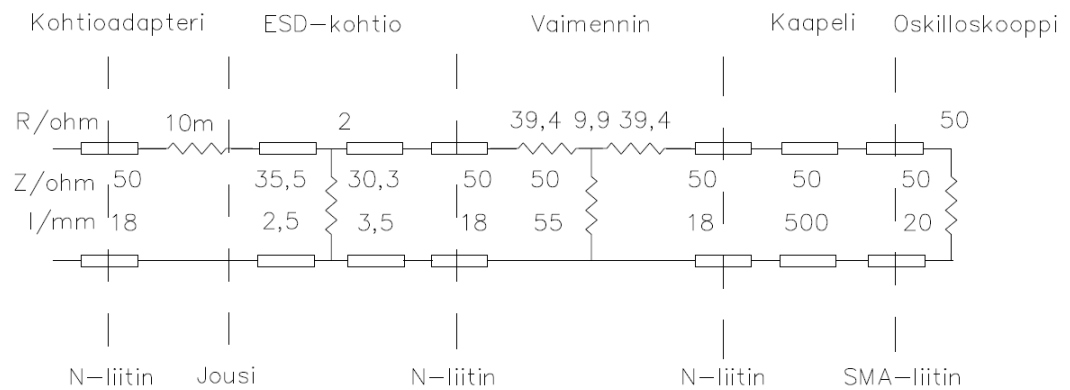


Kuva 2.12 – Vasemmalta: N-uros-kohtioadapteri ja N2R2-kohtioadapteri

Komponenteille on annettu nimet: R2 tarkoittaa runko-osaa numero 2 ja N2, tarkoittaa N-naarasliitintä numero 2 (Kuva 2.12). Nimeämisen avulla pyritään vähentämään vaihtelua, joka johtuu komponenttien valmistustoleransseista ja käytöstä riippuvasta komponenttien erilaisesta muuttumisesta toisiinsa nähden.

### 2.5.3 Kalibrointijärjestelmän piirikaavio

Kalibrointijärjestelmän piirikaaviossa on käytetty osin mitattuja tai mittausten perusteella laskettuja arvoja (esimerkiksi kontaktien resistanssit, 3.4.1) ja osin siirtojohtojen fyysisistä mitoista laskettuja ominaisimpedansseja. Näiden perusteella päädyttiin seuraavanlaiseen piirikaavioon (Kuva 2.13). Piirikaaviossa rivillä  $R/\text{ohm}$  olevat lukevat kuvastavat alapuolella olevan vastuksen resistanssiarvoja,  $Z/\text{ohm}$  vastaavasti ominaisimpedanssiarvoja ja  $l/\text{mm}$  vastaavasti siirtojohtojen pituutta, jolla on tietty ominaisimpedanssi.

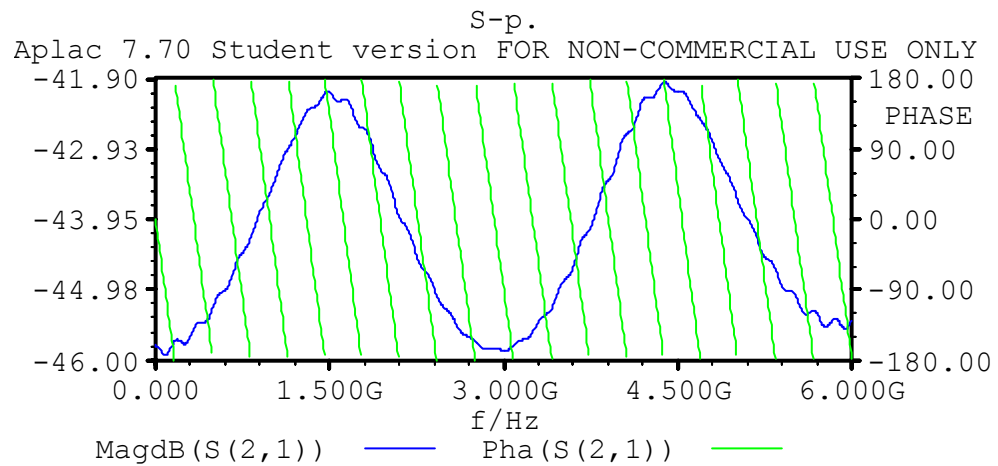


Kuva 2.13 – Kalibrointijärjestelmän ja kohtioadapterin piirikaavio

Piirikaaviossa on merkitty katkoviivalla komponenttien väliset RF-heijastuksia aiheuttavat rajapinnat. Rajapintojen toistettavuutta parannetaan kiristämällä liittimet ja kohtioadapterin kiinnitysruuvit vakiomomenttiin.

Vaimentimen T-sijaiskytkentä kirjallisuudessa esitetyn teorian mukaan ei vastaa mittausten perusteella laskettua sijaiskytkentää [Lehto 2006]. Työssä käytetään mittausten perusteella lasketun T-sijaiskytkennän resistanssiarvoja, jotka ovat  $39,4\Omega$ ,  $9,9\Omega$  ja  $39,4\Omega$  (samat kuin referenssijärjestelmässä, luku 2.3).

Esitetyn piirikaavion parametreilla simuloidessa saadaan sirontaparametrit ( $S_{21}$ , Kuva 2.14). Sirontaparametrien mittauksia käsitellään myöhemmin (luku 3).



Kuva 2.14 – Piirianalyysi vaimennuksesta  $S_{21}$

Aplac-ohjelmalla tehdyssä piirianalyysissä  $S_{21}$  itseisarvo (sininen käyrä) on keskimäärin liian pieni (noin -44 dB), kun se mittauksissa on noin -42,5 dB (luku 3.5.2). Lisäksi sen vaihtelu on noin 4 dB, kun sen pitäisi olla korkeintaan 1 dB vuoden 2005 standardiluonnoksen vaatimuksien (luku 2.4) perusteella [IEC 2005]. Koska piirikaaviolle tehty simulaatio eroaa merkittävästi mittaustuloksista (luku 3), sen edelleen kehittämistä kannattaa harkita. Toisaalta piirikaavio saattaa olla jo riittävän pitkälle kehitetty, koska tällaisille piirikaavioille tehdyt simulaatiot ovat epätarkkoja [Silvonen 2007].

### 3 Mittaukset

Mittausten perusteella voidaan tunnistaa ja poistaa kalibroitijärjestelmän systemaattiset virheet, määrittää epävarmuudet ja toteuttaa jäljitettävyyys kansallisiin mittanormaaleihin. Mittausten perusteella kalibroitijärjestelmä saadaan kalibroitua, jolloin sen ESD-testauslaitteiden kalibroititulokset ovat vertailukelpoisia. Luvussa esitettäviä mittauksia voidaan toistaa kalibroitijärjestelmää myöhemmin verifioitaessa tai uudelleen kalibroitaessa.

#### 3.1 Laitteisto

##### 3.1.1 Kohtioadapteri

Vuoden 2005 standardiluonnos asettaa kohtioadapterille muun muassa seuraavat vaatimukset [IEC 2005]:

- Ominaisimpedanssi  $Z_0 = 50\Omega \pm 2\%$ ,
- Heijastusvaimennus  $S_{11} < -30$  dB, 0 – 1 GHz:n taajuuskaistalla,
- Heijastusvaimennus  $S_{11} < -20$  dB, 1 – 4 GHz:n taajuuskaistalla,
- Läpimenovaimennus  $S_{21} > -0,3$  dB, 0 – 4 GHz:n taajuuskaistalla.

##### 3.1.2 Kohtio

Kohtion ominaisuuksia ovat muun muassa [Pommerenke 2000]:

- Resistanssi  $R_K = 2,04\Omega \pm 2,5\%$ ,
- Siirtoimpedanssi  $Z_K$ , on  $0,983\Omega \pm 2\%$  (missä käytetään 1 A:n virtaa, 6 dB:n vaimenninta ja  $50\Omega$  kuormaa), verifiointi vuosittain,
- Läpimenovaimennusvaihtelu  $\pm 0,3$  dB, 0 - 1 GHz:n taajuuskaistalla,
- Läpimenovaimennusvaihtelu  $\pm 0,75$  dB, 1 GHz - 4 GHz:n taajuuskaistalla.



Ideaalinen staattisen sähköpurkauskohtion resistanssi  $R_K$  olisi lähempänä nollaa. Resistanssia noin  $2\ \Omega$  käytetään, koska kohtion induktanssi suhteessa resistanssiin kasvaisi  $2\ \Omega$  matalammilla resistansseilla merkittäväksi, aiheuttaen epävarmuutta mittaukseen.

Standardin [IEC 1995] mukaisen kohtion vastukset kestävät jatkuvaa tehoa  $P_{\max}$  noin  $0,25\text{W} \cdot 25 = 6,25\text{W}$ .

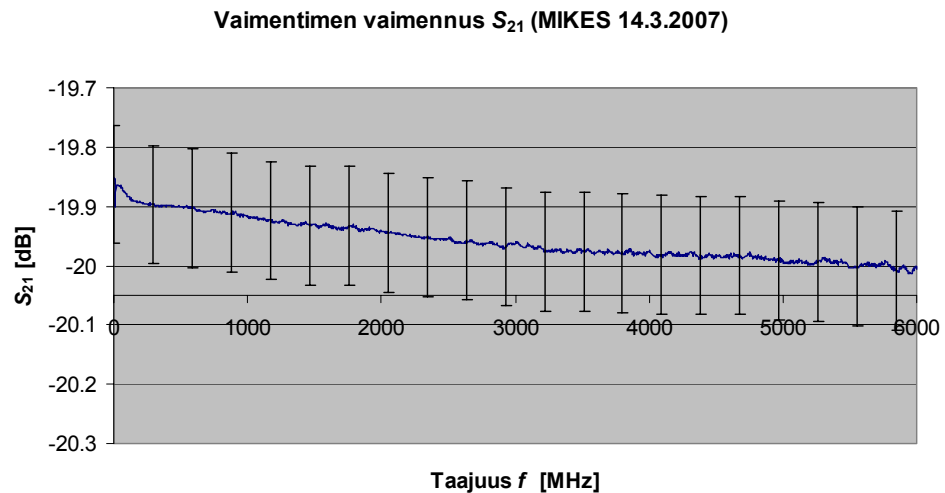
$$I_{\text{sys,max}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R_K}} = 1,75\text{A} \quad (3.1)$$

Tasavirtamittauksissa (luku 3.5.1) täytyy varoa pintaliitosvastuksien ylikuumentumista, joka on vaarana, kun jatkuva virta  $I_{\text{sys}}$  on noin 1,75A tai enemmän (yhtälö 3.1). Luonnoksessa suositeltu virta tasavirtamittaukseen on  $1\text{ A} \pm 1\%$  [IEC 2007].

### 3.1.3 Vaimennin

Käytettävä vaimennin, Weinschel Model 1 on kalibroitu (Kuva 3.2). Vaimentimen ominaisuuksia ovat muun muassa [Aeroflex 2007]:

- Vaimennus on  $20 \pm 0,3\text{ dB}$ , 0 - 12.4 GHz taajuuskaistalla,
- $50\ \Omega$ :n ominaisimpedanssi  $Z_0$ .



Kuva 3.1 – Vaimentimen kalibroitu vaimennus  $S_{21}$

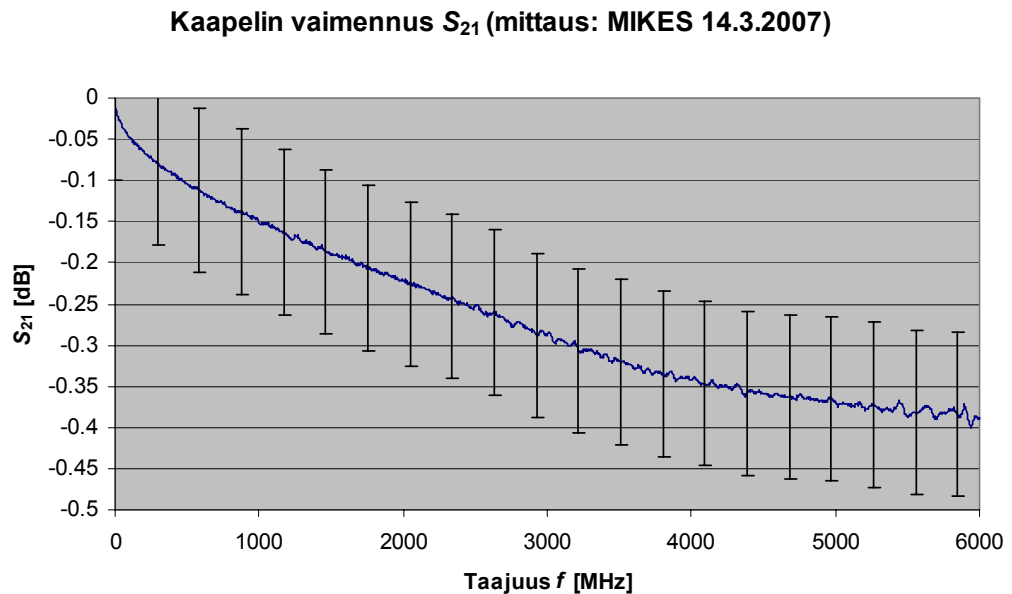
20 dB:n vaimenninta käytetään purkausjännitteen ollessa 8 kV tai vähemmän. 4 voltin offsetilla ja 8 V:n jännitealueella voidaan mitata ainakin purkausvirran huippuarvoltaan  $I_p$  alle 35 A:n virtoja (luku 3.1.6.2).

35 A:n ylittäviä virtoja mitatessa tarvitaan suurempaa vaimennusta kuin 20 dB. Eri vaimenninyhdistelmät täytyy määritellä ja kalibroida erikseen kalibrointijärjestelmän osana.

### 3.1.4 Kaapeli

Sucoflex 104PEA-kaapeli on kalibroitu (Kuva 3.2). Kaapelin ominaisuuksia ovat muun muassa [Huber 2006]:

- Pituus  $l = 50$  cm,
- Vaimennus  $S_{21}$  on pienempi kuin 0,196 dB, 0 - 1,84 GHz taajuuskaistalla,
- Vaimennus  $S_{21}$  on pienempi kuin 0,446 dB, 1,84 - 7,23 GHz taajuuskaistalla,
- Ominaisimpedanssi  $Z_0 = 50 \Omega$ .



Kuva 3.2 – Kaapelin kalibroitu vaimennus  $S_{21}$

Taipuisan kaapelin päissä on momenttiin kiristettävät liittimet. Kohtion jälkeisessä vaimentimessa on N-tyypin liitin ja oskilloskoopissa SMA-liitin (tällöin ei tarvita erillistä N-SMA adapteria).

### 3.1.5 Maadoituskaapeli ja maadoittaminen

Testattavan ESD-testauslaitteen pistooli maadoitetaan noin 2 m pituisella kaapelilla, jonka pituudella ja asennolla on havaittu merkitys ESD-impulssin mittaukseen [IEC 2007]. Kaapeli muodostaa purkaussilmukan, jonka pinta-ala vaikuttaa sähkömagneettisten häiriöiden kytkeytymiseen. Maadoituskaapeli pitää asetella standardin mukaisesti (Kuva 1.1). Oskilloskooppi, ESD-testauslaite ja maadoitusreferenssitaso maadoitetaan rakennuksen potentiaalintasaukseen.

### 3.1.6 Oskilloskooppi

Digitaalisen näytteenotto-oskilloskoopin LeCroy WaveMaster 8600A:n ominaisuuksia ovat muun muassa [LeCroy 2003]:

- Taajuuskaista on 6 GHz,

- Näytteenottotaajuus on 20 GHz,
- Suurin herkkyys on 10 mV / ruutu, kun taajuuskaista on 6 GHz,
- Resoluutio on 8 bittiä.

Oskilloskoopin vertikaali- ja horisontaaliepätkä tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä käsitellään luvuissa 3.1.6.1 ja 3.1.6.2.

#### 3.1.6.1 Horisontaaliepätkä tarkkuus

Käytettävässä nelikanavaisessa oskilloskoopissa näytteenottotaajuus on yhdellä kanavalla 10 GS/s. Yhdistettäessä sisäisesti kaksi näytteenottotaajuudeltaan 10 GS/s –kanavaa saadaan näytteenottotaajuus nostettua kaksinkertaiseksi. Näytteenottoväli on tällöin 50 ps. Nyqvistin kriteerin [MathWorks 1996] perusteella olisi periaatteessa mahdollista mitata 10 GHz:n taajuuksia signaalin laskostumatta, mutta mittausta rajoittaa oskilloskoopin analoginen 6 GHz:n kaistanleveys. Oskilloskoopin kellotaajuuden epävarmuudeksi luvataan  $\leq 1$  ppm lämpötilassa 0 – 40 °C [LeCroy 2003].

Oskilloskoopin nousuaika  $t_{r,osc}$  on noin 60 ps, joka voidaan laskea likimääräisesti jakamalla luku 0,35 oskilloskoopin maksimitaajuuskaistalla 6 GHz [Lehto 1999]. ESD-impulssin nousuaika  $t_r$  ESD-testauslaitteella [EMC-Partner 1997] ja oskilloskoopilla [LeCroy 2003] mitattuna on noin 500 ps. Jos mittaamme oskilloskoopilta nousuajan  $t_r=500$  ps, niin todellinen ESD-impulssin nousuaika  $t_{r,sign}$  on yhtälön 3.2 [Lehto 1999] mukaan noin 496 ps. Yhtälön perusteella oskilloskoopin nousuajan rajallisuus aiheuttaa ESD-impulssin nousuajan mittaukseen noin 1 % systemaattisen virheen:

$$t_r = \sqrt{t_{r,osc}^2 + t_{r,sign}^2} \rightarrow t_{r,sign} = \sqrt{t_r^2 - t_{r,osc}^2} \approx 496 \text{ ps} \quad (3.2)$$

#### 3.1.6.2 Vertikaaliepätkä tarkkuus

Vertikaaliepätkä tarkkuus riippuu käytettävän asteikon suuruudesta. Parhaimmillaan oskilloskoopin herkkyys on 2 mV / ruutu ja huonoimmillaan 1 V / ruutu. 6 GHz:n taajuuskaistalla herkkyys on parhaimmillaan 10 mV / ruutu. Vertikaaliresoluutio

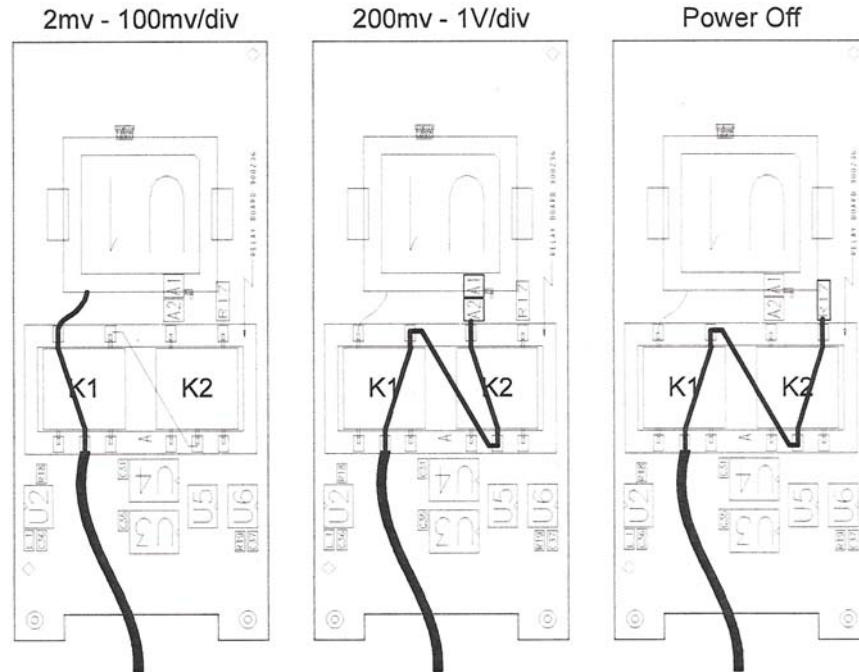
on 8 bittiä. Työssä ehdotetaan eri tasojen ESD-impulsseille käytettäviä mittausalueita ja vastaavia asteikkojen suuruuksia (Taulukko 3.1). Kiinnitettyjen mittausaluiden käytöllä voidaan lisätä toistettavuutta eri mittauskertojen välillä ja vähentää vaihtelua, joka liittyy oskilloskoopin erilaisten asetuksien käyttöön. Toisaalta mitä tarkemmin ESD-impulssi on skaalattu oskilloskoopin näytölle, sitä tarkemmin se pystytään mittaamaan. Mittaukseen tulee satunnaista vaihtelua, jos samalla ESD-testauslaitteella ja jännitetasolla mittaasetuksia muutetaan.

*Taulukko 3.1 – Oskilloskoopin mittaalueet ja offsettasot*

ESD-impulssi	Jänniteasteikko	Jännitealue	Offset
$U$ [kV]	V / ruutu	$U$ [V]	$U$ [V]
$\pm 8$	0,890	7,12 V	$\pm 3,120$
$\pm 6$	0,660	5,28 V	$\pm 2,310$
$\pm 4$	0,455	3,64 V	$\pm 1,590$
$\pm 2$	0,230	1,84 V	$\pm 0,805$

Nimellistä 30 A ESD-virtaa (8 kV) mitatessa voidaan käyttää oskilloskoopin asteikkoa 0,890 V / ruutu, jolloin oletettaessa, että impulssi täyttää 8 ruutua, niin jännitteen suuruus on  $0,890\text{V} \cdot 8 = 7,12\text{ V}$ , josta vähennettäessä offset 3,12V, saadaan 4V (4 V on oskilloskoopin jännitesuojauksen raja). Jos ESD-virta ylittää 30 A, täytyy ehdotettuja asetuksia (Taulukko 3.1) muuttaa.

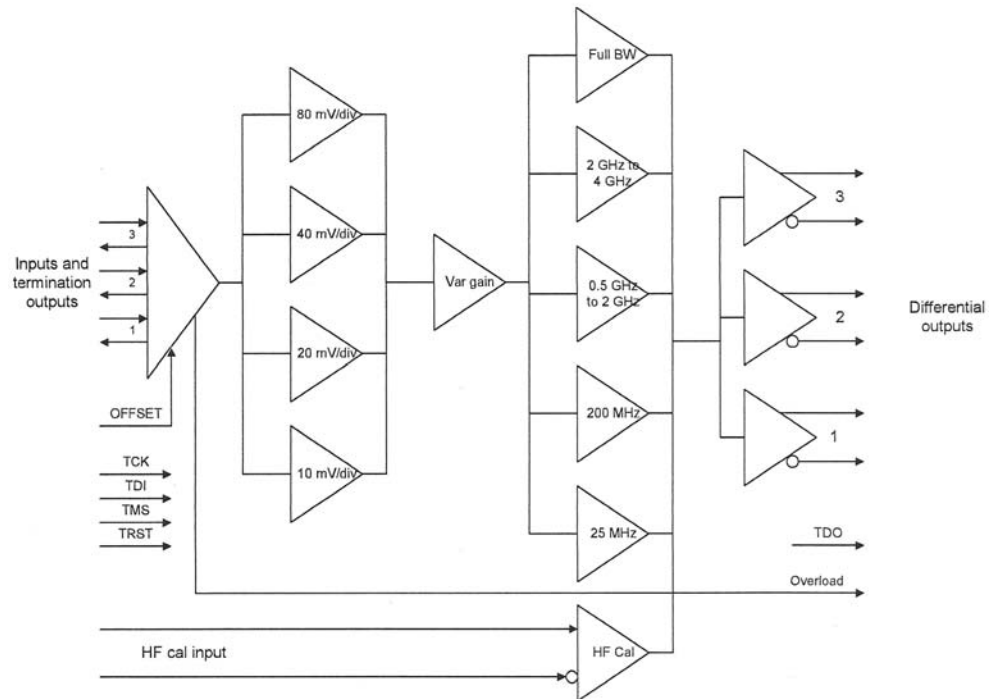
Oskilloskoopin vahvistimessa on kolme reittiä sisääntulevalle signaalille (Kuva 3.3), joista yksi reitti kytkeytyy releen (K1) kautta suoraan jännitettä mittaavalle yksikölle (U1), toinen reitti vaimentaa suhteessa 10 (20 dB) ja kolmannessa reitissä sisääntulo kytketään maahan 50  $\Omega$  vastuksen kautta. Koska ESD-mittauksessa käytettävillä jännitetasoilla asteikko on suurempi kuin 200 mV / ruutu, mitattava signaali kulkee kahden 10 dB:n vaimentimen (A1, A2) läpi. Kytkemisen 20 dB:n vaimentavaan piiriin (tai ylijännitesuojauspiiriin) hoitavat kuvan releet K1 ja K2. Signaalin muutos analogisesta digitaaliseksi tapahtuu piirissä U1 [LeCroy 2003].



Kuva 3.3 – Oskilloskoopin sisäisten vaimentimien kytkentä [LeCroy 2003]

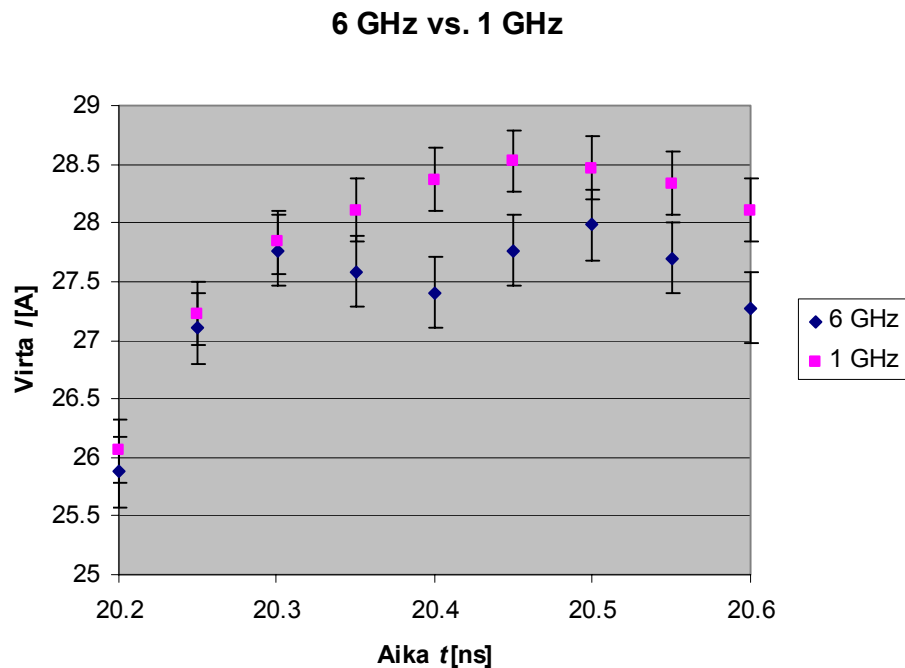
### 3.1.6.3 ESD-impulssin mittaukset

Jännitettä mittaava yksikkö U1 sisältää neljä vahvistinta eri mittausalueille (80 mV/div, 40 mV/div, 20 mV/div ja 10 mV/div) ja kaistanpäästöpiirit (Kuva 3.4).



Kuva 3.4 – Oskilloskoopin etuasteen kytkentäkaavio [LeCroy 2003]

Eri taajuuskaistojen (Full BW 6 GHz, 4 GHz, 2 GHz, 0,5 GHz, 0,2 GHz 0,025 GHz) käyttöä ESD-impulssin mittaukseen testattiin. Suurimman taajuuskaistan (6 GHz) käyttö verrattuna 1 GHz:n kaistaan vaikuttaa huippuarvoon (Kuva 3.5) noin 2%.



Kuva 3.5 – ESD-impulssin huippuarvon mittaaminen 6 GHz:n ja 1 GHz:n taajuuskaistalla.

Kuvaan on zoomattu mitatun ESD-impulssin huipun kohdalta otetut näytteet

Mittauksen (Kuva 3.5) perusteella standardin [IEC 1995] ehdottamalla 1 GHz:n taajuuskaistalla huippuarvo on noin 2% suurempi verrattuna 6 GHz:n taajuuskaistalla tehtyyn mittaukseen. Mittauksen virherajat ovat toistettujen mittausten keskihajontoja. Molempiin mittauksiin vaikuttavat samat systemaattiset virheet ja ei-tilastolliset epävarmuuden, joten mittaussarjat ovat vertailukelpoisia.

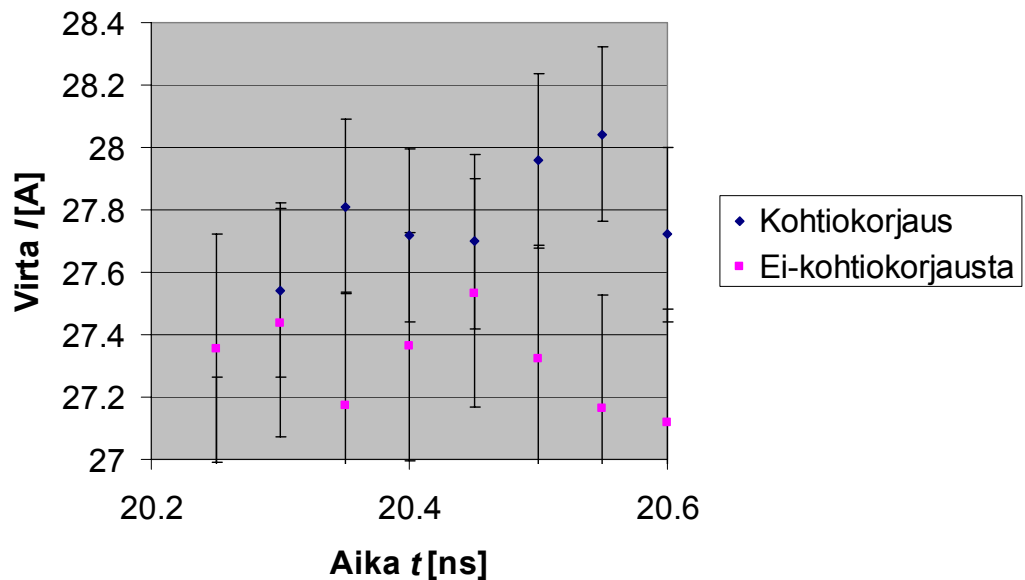
Referenssijärjestelmän (luku 2.3) taajuustason korjaukset (kohtiokorjaus, vaimenninkorjaus) vaikuttivat testauslaitteen [EMC-Partner 1997] antaman 8 kV:n ESD-impulssin toistettavuuteen nähden merkittävästi seuraavissa tapauksissa:

- vaimenninkorjausta käytettäessä nousuaika  $t_r$  on noin 1,8 % pienempi verrattuna tilanteeseen, kun sitä ei käytetä.



- kohtikorjausta käytettäessä virrat  $I_p$  (Kuva 3.6, kuvassa on huippukohtaan tarkennettu tilanne ja noin 20 ns viive) ja  $I_{30}$  ovat noin 1% suurempia ja nousuaika  $t_r$  on noin 1 % pienempi kuin ilman kohtikorjausta.

### Kohtio korjaus vs. ei-kohtikorjausta



Kuva 3.6 – Referenssijärjestelmän kohtikorjauksen vaikutus ESD-impulssin huippuarvoon. Vain impulssin huipun kohdalta otetut näytepisteet näkyvät kuvassa.

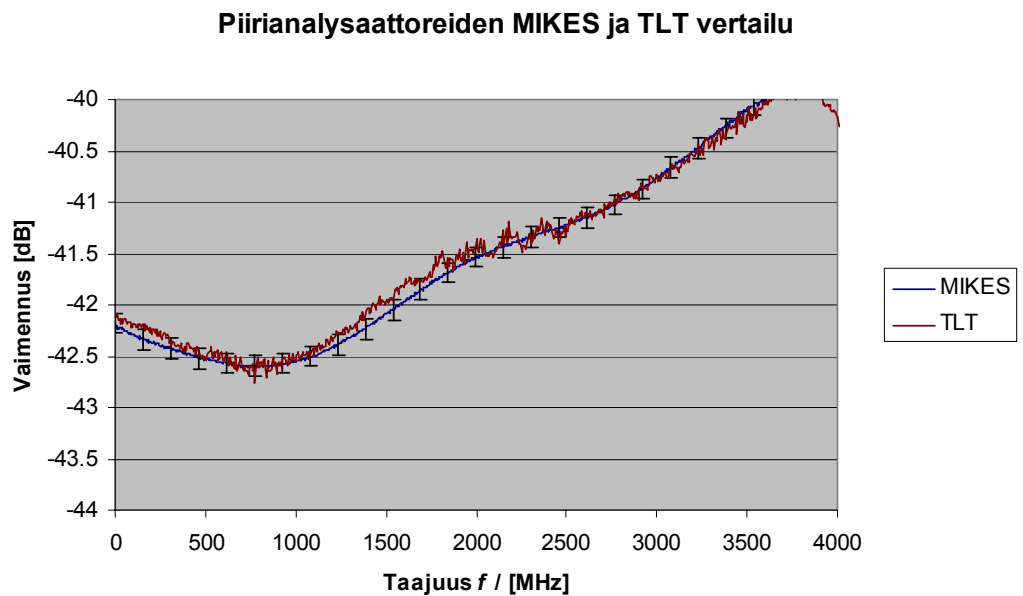
Kohtikorjaus referenssijärjestelmässä korjasi virtahuipun jännitemittauksesta laskettua virta-arvoa noin 1 %. Mittauksen epävarmuusrajat ovat kuten mittauksessa ”6 GHz vs. 1 GHz”.

#### 3.1.7 Piirianalysaattori

Kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvasteen mittaamiseen tarvitaan kohtioadapteri ja piirianalysaattori. Piirianalysaattorin käytössä on tärkeää, että se kalibroidaan oikein ja että mittaasetukset ovat oikein (Liite D – Piirianalysaattorin kalibrointi ja kalibrointirajapinta).

Mittauksia tehtiin Tietoliikennelaboratorion piirianalysaattorilla [Ballman 2000]. Näiden mittauksen ongelma on, että mittaukset eivät ole jäljitettäviä. Varsinaiset

kalibrointimittaukset tilattiin kansalliselta mittanormaalilaboratoriolta (MIKES) jäljitettävyyden saamiseksi. MIKESin kalibroinnin epävarmuus on alle  $\pm 0,2$  dB. Epävarmuus 0,2 dB on esitetty myös laitteen valmistajan spesifikaatioissa ei-tilastollisena epävarmuutena [Agilent 2004]. Kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin mittauksessa  $S_{21}$  perusteella tiedetään, että TLT ja MIKES piirianalysaattoreiden ero ei pysy MIKES mittauksen epävarmuusrajojen sisällä. Tietoliikennelaboratorion mittausten avulla kehitettiin kohtioadapteria ja mitattiin myös kohtioadapterin, vaimentimen ja kaapelin taajuusvastetta, koska TLT- ja MIKES-piirianalysaattorien mittaukset ovat jossain määrin verrannolliset (Kuva 3.7).



Kuva 3.7 – Tietoliikennelaboratorion ja MIKESin piirianalysaattoreiden ero kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin  $S_{21}$  mittauksessa

### 3.1.8 Erikoistyökalut

Työssä tarvittavat erikoistyökalut ovat:

- Momenttiruuvimeisseli, momentti 0,6 Nm,
- N-liittimien momenttiavain, momentti 1 Nm,
- SMA-liittimien momenttiavain, momentti 1 Nm,
- Nelijohtomittausadapteri luvuissa 3.4.1 ja 3.5.1 esitettäviin mittauksiin.

Nelijohtomittausadapterilla voidaan tasavirta- ja kontaktiresistanssimittaukset toistaa paremmin kuin vastaavilla N-BNC-banaanijohtoadapterilla (Kuva 3.8). Nelijohtomittausadapterilla voidaan liittyä kohtioadapteriin tasavirralla tehtävässä jakosuhtemittauksessa.



*Kuva 3.8 – Kullattujen kohtioadaptoreiden kontaktiresistanssimittaus*

### 3.2 Mittaustilat ja niiden ympäristöolosuhteet

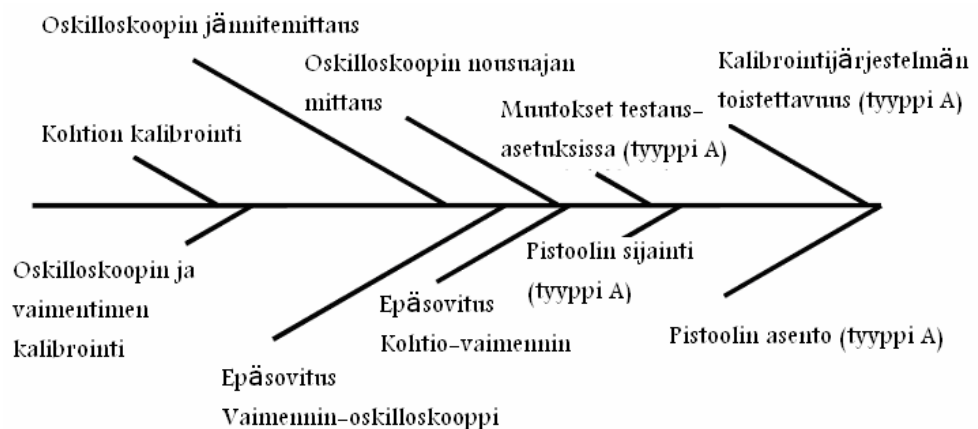
Työn jäljitettävät mittaukset tapahtuvat MIKESin tiloissa lukuunottamatta tasavirtamittauksia ja ESD-impulssien oskilloskooppimittauksia. MIKESin tiloissa ympäristön olosuhteet vaihtelevat vähemmän kuin Teknillisen korkeakoulun tiloissa. Koska kalibrointijärjestelmän taajuusvastemittaukset tapahtuvat olosuhteiltaan tarkemmin valvotuissa tiloissa ja varsinaiset testauslaitteiden kalibroinnit Teknillisellä korkeakoululla, on syytä tarkistaa, ympäristön olosuhteiden merkitsevyys mittaustuloksiin.

Tämän työn yhteydessä ovat tärkeimpiä mittaustiloja Teknillisessä korkeakoulussa olleet Tietoliikennelaboratorion työtilat ja varsinaisessa ESD-mittauksessa käytetyt Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratorion työtilat.

Näissä tiloissa ympäristön olosuhteet – lämpötila, kosteus ja ilmanpaine – ovat riippuvaisia vuodenaikasta ja myös siitä mihin aikaan päivästä mittaukset tapahtuvat. Sähköverkot ja suurjännitetekniikan laboratoriossa olosuhteita seurataan lämpötila-, kosteus-, ja ilmanpainemittareilla, joiden lukemat kirjataan mittausten yhteydessä ylös ja dokumentoidaan kalibrointitodistukseen, kuten sovellettavassa standardissa vaaditaan [IEC 1995].

### 3.3 Epävarmuustekijät

Epävarmuustekijät opitaan tuntemaan mittauksia tehdessä ja niitä toistettaessa. Vuoden 2005 standardiluonnoksessa [IEC 2005] on esitetty diagrammi kalibrointijärjestelmän epävarmuustekijöistä (Kuva 3.9). Standardiluonnoksesta puuttuvat esimerkiksi ESD-pistoolin maadoituksen sijainti, kaapelin kalibrointi ja kaapelin epäsovitukset.



Kuva 3.9 – Epävarmuustekijät kalanruotodiagrammissa [IEC 2005]

Kalanruotodiagrammin epävarmuustekijät eivät ole kattavat, koska siitä puuttuu esimerkiksi kaapeli. Epävarmuustekijöitä on enemmän kuin niitä kannatta luetella. Oleellista on oppia tunnistamaan merkittävimmät epävarmuustekijät ja ottaa ne huomioon epävarmuusarviossa. Kaapelin taajuusvasteeseen voi vaikuttaa kaapelin asentoa muuttamalla. Toistettavuutta parannettaessa maadoitusreitti olisi parhaimmillaan kiinteä. Mittauskaapeli olisi parhaimmillaan lyhyt aaltojohto,

suoraan ESD-kohtioon kytketystä vaimentimesta oskilloskooppiin. Tällöin kaapelit olisivat kiinteitä ja niiden asento tai sijainti ei voisi muuttua.

Epävarmuustekijöistä tehdään epävarmuusbudjetti, josta hyviä esimerkkejä löytyy lähteistä [Hilty 2001] ja [IEC 2007]. Epävarmuusbudjetissa esitetään epävarmuudet kattavuuskertoimella 2 ( $k=2$ ) ja tarvittaessa osatekijät eli mitattavien parametrien tyyppi A ja tyyppi B epävarmuudet. Tyypin A ja tyyppi B epävarmuuksien neliösumman neliöjuuresta saadaan standardiepävarmuus. Kertomalla standardiepävarmuus halutun luottamustason mukaisella kattavuuskertoimella saadaan parametrin epävarmuus.

### 3.3.1 Tilastolliset ja ei-tilastolliset epävarmuustekijät

Satunnaiset eli tilastolliset epävarmuuskomponentit (tyyppi A) saadaan mittausten keskihajontoina. Mittausten toistojen välissä muutetaan vuorollaan yhtä luontaisesti satunnaisesti muuttuvaa tekijää. Tämän tekijän aiheuttama keskihajonta saadaan laskettua mittaustuloksien perusteella. Satunnaisuutta aiheuttavat lisäksi muun muassa lämpötilavaihtelut ja laitteiston muuttuminen sen ikääntyessä

Ei-tilastolliset epävarmuuskomponentit (tyyppi B) saadaan mittalaitteen kalibroinnista. Vertaamalla voimassa olevaa kalibrointitodistusta aikaisempiin kalibrointitodistuksiin, nähdään mittalaitteen stabiilius. Stabiilin mittalaitteen kalibroinnin pysyvyyteen voidaan paremmin luottaa. Mittalaitteen valmistajan ilmoittamat epävarmuudet pyrkivät kattamaan jokaisen vastaavan mittalaitemallin epävarmuudet. Kalibrointitodistuksen epävarmuus vastaa paremmin käytettävän mittalaitteyksilön epävarmuuksia. Tasavirtamittalaitteiden valmistajan antamissa spesifikaatioissa on otettu huomioon etäisyys kalibrointiajankohdasta [HP 1994].

Systemaattisten muutosten tunnistaminen perustuu kokemukseen. Systemaattinen virhe pitää poistaa lopullisesta mittaustuloksesta. Esimerkiksi kalibrointitodistuksesta saadaan mittalaitteen systemaattinen virhe.

### 3.4 Kohtioadapterien mittaukset

Kohtioadapterien käyttökelpoisuus taajuusvastemittauksiin perustellaan kohtioadapterien tasavirtamittauksilla ja taajuusvastemittauksilla.

#### 3.4.1 Tasavirtamittaukset

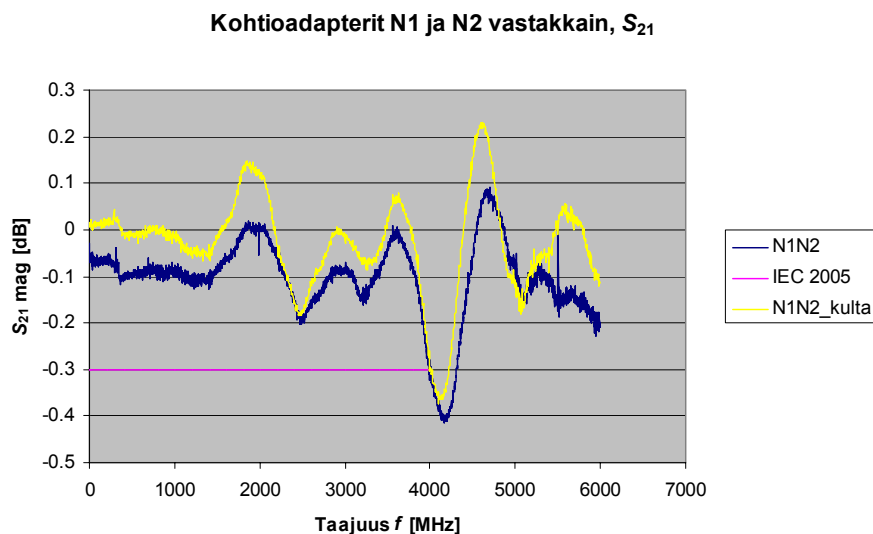
Kullattujen kohtioadaptereiden N1-N2 (Kuva 3.8) keskijohtimen kontaktiresistanssiksi mitattiin  $(2,5 \pm 0,5) \text{ m}\Omega$ , ja kullattujen kiekkojen R1-R2 kontaktiresistanssiksi  $(0,04 \pm 0,02) \text{ m}\Omega$ . Kohtioadapterin ja kohtion keskijohtimien kontaktiresistanssiksi mitattiin  $(6,7 \pm 0,7) \text{ m}\Omega$ .

#### 3.4.2 Taajuusvastemittaukset

Kahden vastakkain kytketyn kohtioadapterin taajuusvastetta mitataan piirianalysaattorilla. Mittauksilla varmistetaan, että kohtioadapteri ei ole merkittävä tekijä mitattaessa piirianalysaattorilla kohtioadapteria, kohtiota, vaimenninta ja kaapelia.

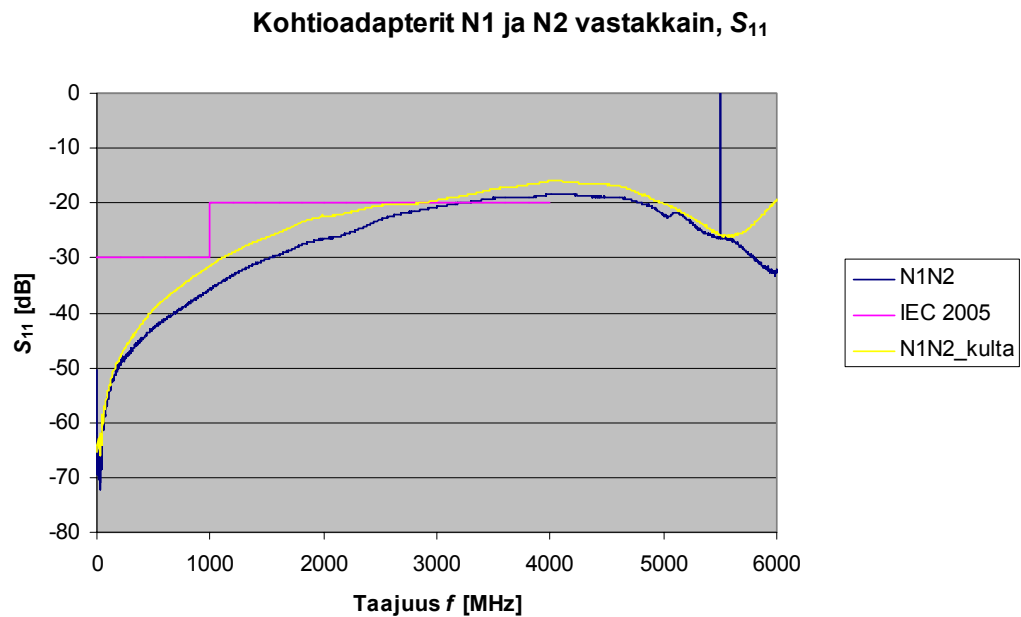
Mittauksia kohtioadaptereille ovat:

- Läpimenovaimennus  $S_{21}$  (Kuva 3.10),
- Heijastusvaimennus  $S_{11}$  (Kuva 3.11).



Kuva 3.10 – Kohtioadapterit vastakkain  $S_{21}$ , mittaus: TLT-laboratorio

Beryllium-kuparista tehdyllä jousella varustetta kohtioadapteri (Liite C – Kohtioadapterin kehittämisprosessi) kullattiin, jotta sen taajuusvaste täyttäisi vuoden 2005 standardiluonnoksen [IEC 2005] vaatimukset. Taajuusvaste ei kultaamisen jälkeenkään täyttänyt vuoden 2005 standardiluonnoksen vaatimuksia (Kuva 3.10 ja Kuva 3.11). Kultaamisen jälkeisen heijastusvaimennuksen  $S_{11}$  heikkenemisen syy voi olla eristeaineen permittiivisyyden muutos, kun jousen tukemiseksi asetettiin eristeprikkoja (Kuva 2.12).



Kuva 3.11 – Kohtioadapterit vastakkain  $S_{11}$ , TLT-laboratorio

Vuosien 2005 ja 2007 standardiluonnosten [IEC 2005][IEC 2007] vaatimukset täyttyvät noin 3 GHz:n taajuudelle asti heijastusvaimennukselle  $S_{11}$ , suuremmilla taajuuksilla niitä ei aivan saavuteta. Läpimеноvaimennus  $S_{21}$  täyttää standardiluonnosten vaatimukset.

### 3.5 Kohtioadapterin, kohtion, kaapelin, vaimentimen ja oskilloskoopin mittaukset

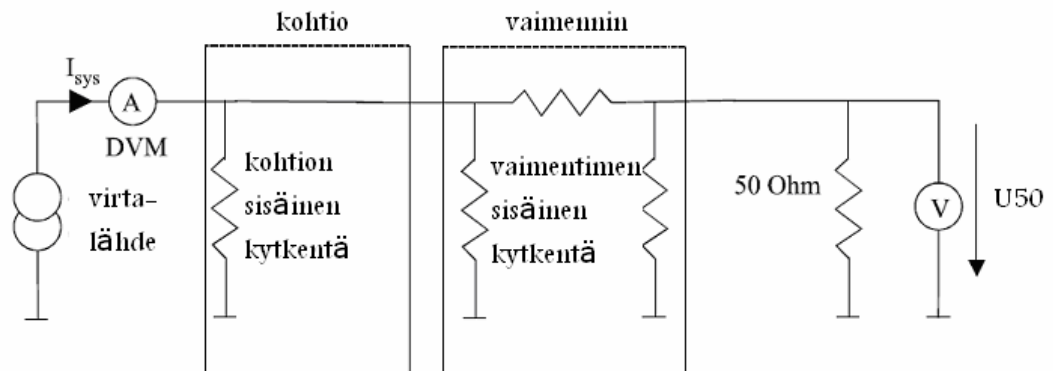
Kohtioadapterin, kohtion, kaapelin, vaimentimen ja oskilloskoopin jäljitettäviä tasavirtamittauksia on tehty HP 3458 A mittalaitteilla [HP 1994].

Kohtioadapterin, kohtion, kaapelin, vaimentimen

- jäljitettäviä taajuustason mittauksia on tehty piirianalysaattorilla Agilent E8357A [Agilent 2004] MIKESissä.
- verifiointimittauksia voidaan tehdä esimerkiksi TKK:n Radiotekniikan ja Tietoliikennetekniikan laboratorioissa olevilla piirianalysaattoreilla.

### 3.5.1 Tasavirtamittaukset

Kohtioadapteri kiinnitetään kohtioon ja kohtioadapteriin liitytään nelijohtomittausadapterilla (kahdella johtimella). Tasavirran  $I_{\text{sys}}$  ja tasajännitteen  $U_{50}$  mittauksissa on käytetty virtana  $I_{\text{sys}}$  200 mA:n ja 500 mA:n virtoja, kun luonnoksessa [IEC 2005] suositellaan noin 1000 mA:n virtaa. Oskilloskoopin liitinjännitettä  $U_{50}$  mitataan käyttäen oskilloskoopin liittimessä SMA T-liitintä jaottimena. (Kuva 3.12)



Kuva 3.12 – Tasavirtamittaus [IEC 2005]

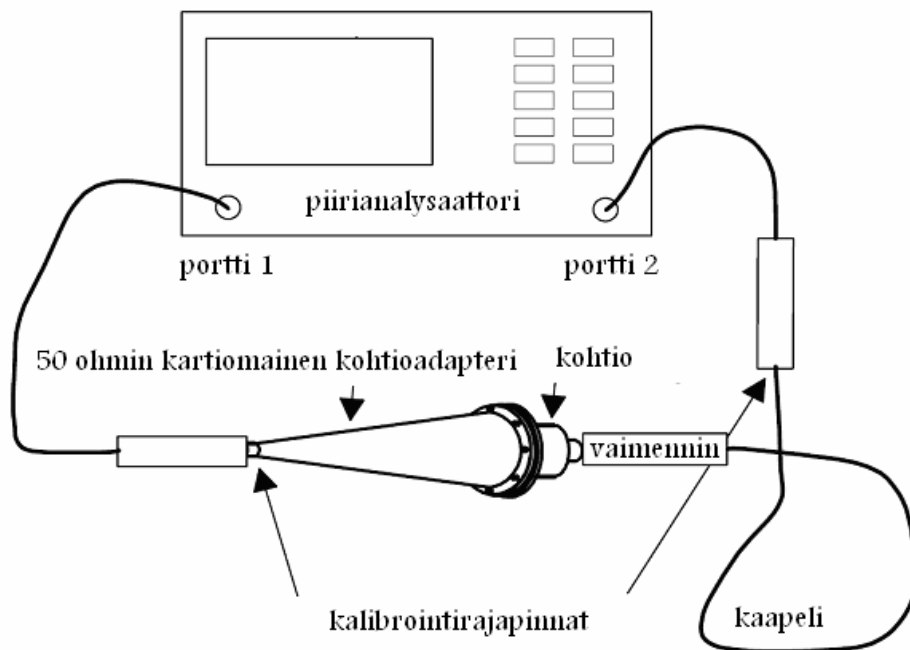
Tasavirtamittauksista lasketaan siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  (luku 4.1) oskilloskoopin mittaaman jännitteen kertoimeksi vertailuarvo piirianalysaattorimittauksista laskettuun matalien taajuuksien siirtoadmittanssiin  $Y_{\text{sys}}(f \approx 300 \text{ kHz})$  (luku 4.2).



### 3.5.2 Kohtion, vaimentimen ja kaapelin kalibrointi

Kohtion, vaimentimen ja kaapelin kalibrointi perustuu piirianalysaattorimittauksiin  $S_{11}$  ja  $S_{21}$ . Edellytyksenä on, että kohtioadapteri ei aiheuta liikaa virhettä mittaukseen (luku 3.4.2).

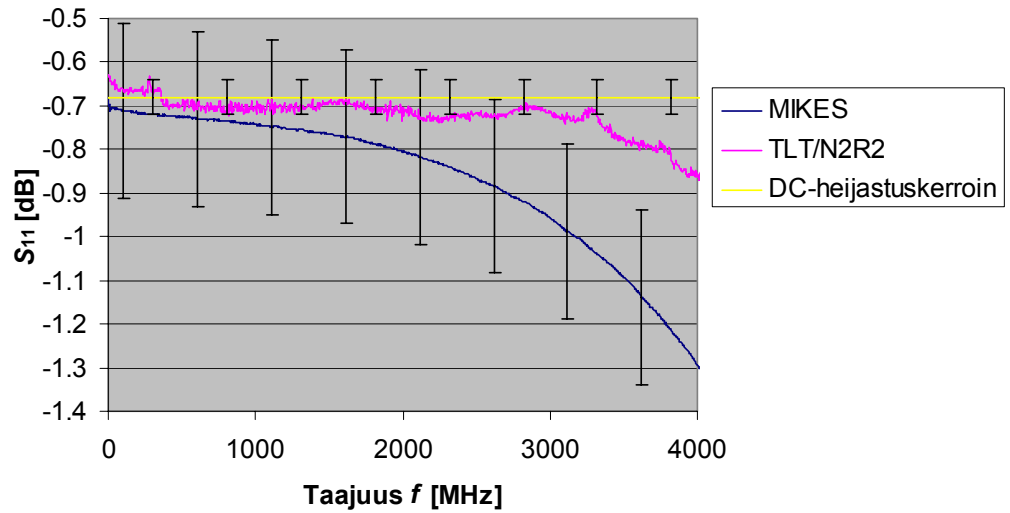
Piirianalysaattoriin kytketään kohtioadapteri, kohtio, vaimennin ja kaapeli (Kuva 3.13). Kohtioadapteri kytketään piirianalysaattorin porttiin 1 ja kaapeli porttiin 2. Kohtioadapteri, kohtio, vaimennin ja kaapeli ovat passiivisia komponentteja ja siksi resiprookkisia, eli läpimenovaimennus  $S_{21}$  on sama kuin läpimenovaimennus  $S_{12}$  [Silvonen 2005]. Resiprookkisuudesta huolimatta mittaus kannattaa tehdä kuvan mukaisesti, jotta S-parametrit  $S_{11}$  ja  $S_{21}$  eivät sijaitse S-parametreissa  $S_{22}$  ja  $S_{12}$ .



Kuva 3.13 – Piirianalysaattorimittaus. [IEC 2005]

Matalilla taajuuksilla mitattu heijastusvaimennus  $S_{11}(f=300 \text{ kHz})$  on ollut  $(0,923 \pm 0,03)$ , joka erosi nimellisten ominaisimpedanssien perusteella lasketusta (luku 2.4) heijastuskertoimesta noin 0,2% (Kuva 3.14).

**Kohtioadapterin ja kohtion  $S_{11}$  (vaimennin ja kaapeli mukana mittauksessa)**

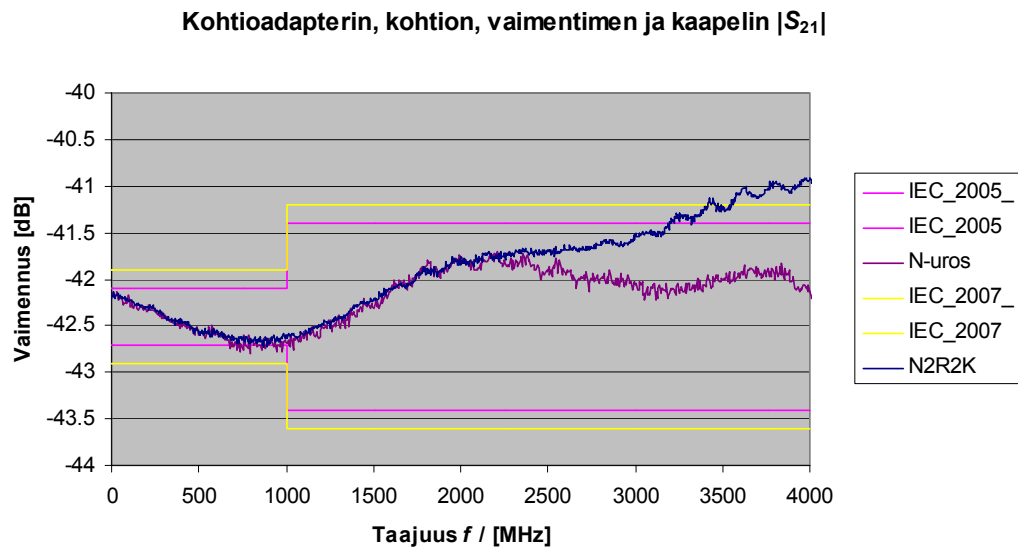


Kuva 3.14 – Heijastusvaimennus  $S_{11}$  verrattuna laskennalliseen DC-heijastuskertoimeen, MIKES-mittauksessa on käytössä vanhempi versio kohtioadapterista.



Kuva 3.15 – Kohtio, vaimennin, kaapeli, kohtioadapterivaihtoehdot: N-uros oikealla, N2 vasemmalla, runko-osa R2 ei ole kuvassa.

Kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin  $S_{21}$  läpimenovaimennukselle (Kuva 3.15) vuosien 2005 ja 2007 standardiluonnoksien vaatimukset (luku 2.4) toteutuvat 3 GHz:n taajuuskaistalle N2-kohtioadapterilla (N2R2) alustavien TLT-mittausten (Kuva 3.16) perusteella. Myöhemmin tehtävillä MIKESin mittausten perusteella toteutetaan kohtion, vaimentimen ja kaapelin kalibrointi. Samalla viimeisimmän standardiluonnoksen vaatimuksien toteutuminen voidaan varmistaa [IEC 2005][IEC 2007].



Kuva 3.16 – Läpimenovaimennuksen  $S_{21}$  vaatimukset (lila ja keltainen) ja mittaustuloksia (sininen ja violetti), mittaukset TLT-laboratoriossa.

Jos vuoden 2007 standardiluonnos standardoidaan ja  $S_{21}$ -vaatimusta ei toteuteta mitattaessa vaatimusten mukaisella kohtioadaptoreilla, jolloin pitää tehdä taajuusvastekorjaus. Tätä kannattaa pyrkiä välttämään, johtuen taajuustason korjauksen aiheuttamasta vaikeudesta epävarmuuslaskentaan. Fourier-muunnosta ei voida käyttää epävarmuuslaskelmaohjelmassa ja sen analyttinen derivointi on vaikeaa.

### 3.5.3 Oskilloskoopin kalibrointi

Oskilloskooppia ei ehditty kalibroimaan tämän työn puitteissa. Siksi oskilloskoopin amplitudivasteen ja impedanssivasteen epävarmuuksia ei tunneta.

### 3.5.3.1 Impedanssivaste $Z_{50}(f)$

Siirtoadmittanssin  $Y_{\text{sys}}$  yhtälössä (luku 4.2.1) lukuarvo  $50 \Omega$  kuvaa oskilloskoopin resistanssia ohmeina. Oskilloskoopin impedanssivaste  $Z_{50}(f)$  saattaa poiketa merkittävästi tasaviralla mitatusta  $50 \Omega$ :sta. Jos impedanssivasteen  $Z_{50}(f)$  mittauksia ei ole, paras vaihtoehto on käyttää valmistajan ilmoittamaa impedanssivastetta  $Z_{50}(f) = 50 \Omega \pm 2\%$  [EMC-Partner 1997].

## 3.6 Epäsuoran sähkömagneettisen kytkeytymisen mittaukset

Oskilloskoopin suojaaminen Faradayn häkillä ei ole välttämätöntä, jos pystytään osoittamaan, että epäsuora sähkömagneettinen kytkeytyminen ei vaikuta merkittävästi kalibrointituloksiin [IEC 1995][IEC 2005]. Ilman Faradayn häkkiä oskilloskooppia suojaa maadoitettu ja johtava  $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$  suuruinen metalliseinä, joka on ESD-testauslaitteen ja mittaavan oskilloskoopin välissä.

Häiriötaso on vuoden 2005 standardiluonnoksen [IEC 2005] mukaan riittävän pieni, kun oskilloskooppi ei liipaise:

- vaikka oskilloskoopin liipaisutaso on  $\leq 10\%$  matalimmasta kalibroinnissa käytettävästä liipaisutasosta [IEC 2005]
- ESD-testauslaite purkautuu suurimmalla kalibroinnissa käytettävällä jännitetasolla kohtion ulkokehään normaalin kohtion kontaktipinnan sijaan [IEC 2005]

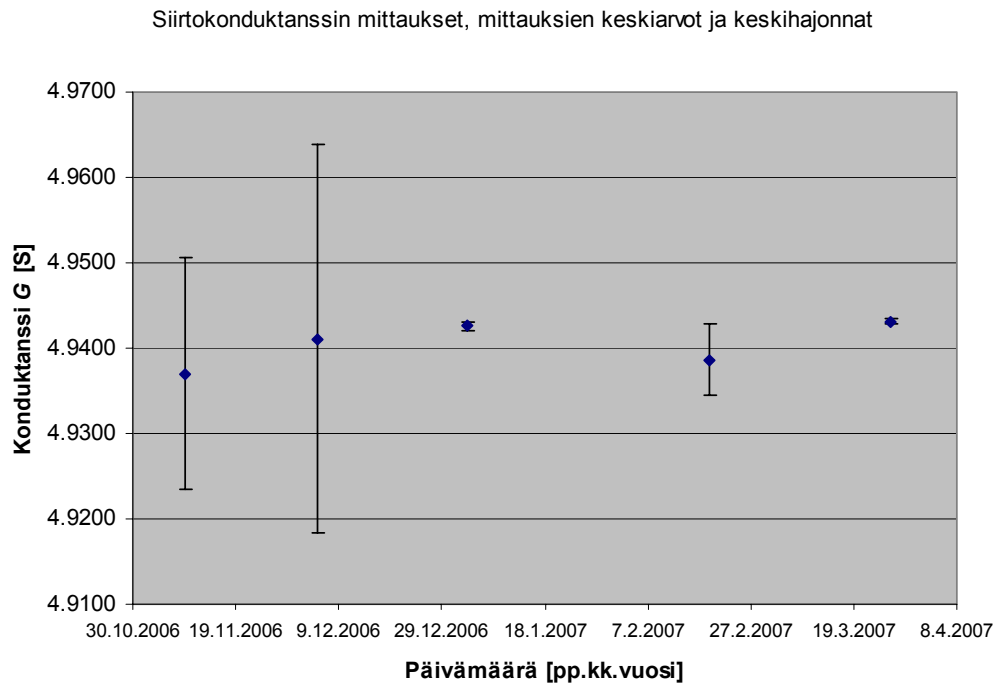
Epäsuora sähkömagneettinen kytkeytyminen testataan kalibrointijärjestelmän kalibroinnin yhteydessä. Oskilloskooppi voidaan tarvittaessa suojata siten, että vaatimukset täyttyvät. Epäsuoraa kytkeytymistä mitattiin käyttäen vuoden 2005 standardiluonnoksessa [IEC 2005] esitettyä  $8 \text{ kV:n}$  kontaktipurkauksen jännitetasoa ja liipaisutasona  $10\%$  pienimmän jännitealueen (luku 3.1.6.2) liipaisutasosta. Mitattu jännite huipusta huippuun on ollut noin  $8 \text{ mV}$ , joka on noin  $1\%$  pienimmästä  $0,8 \text{ V}$  liipaisutasosta.

## 4 Laskenta

Suurjännitetestaustekniikkaa käsittelevässä standardissa vuodelta 1994 [IEC 1994] ehdotetaan käytettäväksi käsitettä jakosuhte kuvaamaan vastaavia kuin työssä on ESD-impulssin aiheuttaman jännitteen  $u_n(t_n)$  suhde kohtioon saapuvaan ESD-impulssin virtaan. Jakosuhteen sijaan samasta asiasta työssä käytetään käsitteitä siirtoimpedanssi  $Z_{\text{sys}}$ , siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}$ , siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$ , koska eri käsitteillä voidaan erottaa eri asiat toisistaan, kuten seuraavassa selitetään. Siirtoimpedanssi  $Z_{\text{sys}}$  on oskilloskoopilta mitattavan ESD-impulssin jännitteen  $u_n$  suhde kohtioon syötettävään ESD-virtaan  $i_n$ . Siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  on kohtioon syötettävän tasavirran  $I_{\text{sys}}$  suhde oskilloskoopin liittimien tasajännitteeseen  $U_{50}$ . Siirtoresistanssi  $R_{\text{sys}}$  on siirtokonduktanssin  $G_{\text{sys}}$ , käänteisluku. Vuoden 2005 standardiluonnoksessa [IEC 2005] käytetään siirtoimpedanssia  $Z_{\text{sys}}$  siirtoresistanssin  $R_{\text{sys}}$  sijasta, mutta tässä työssä halutaan korostaa, että kalibrointijärjestelmän vaste tasavirralla ei ole sama kuin korkeilla taajuuksilla. Työssä käytetään siirtoimpedanssin  $Z_{\text{sys}}$  käänteislukua siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}$ . Siirtoadmittanssivaste  $Y_{\text{sys}}(f)$  kerrottuna taajuusalueeseen muutetulla oskilloskoopin jännitteellä  $U_n(f)$  on ESD-virta  $I_{\text{sys}}(f)$ . Muutettaessa ESD-virta  $I_{\text{sys}}(f)$  aikatasoon saadaan kalibrointijärjestelmän taajuusvasteella korjattu mitattu impulssi,  $i_n(t_n)$ .

### 4.1 Siirtokonduktanssi $G_{\text{sys}}$

HP3458A:lla [HP 1994] tehdyissä tasavirtamittauksista laskettu siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  on  $(4,943 \pm 0,006) \Omega$  (Kuva 4.1). Toistojen välillä vaihdettiin oskilloskoopin asetusta vastaamaan keskimäärin eri ESD-mittausasetuksia. Toistojen välillä myös polariteettia muutettiin, kuten ehdotetaan muun muassa vuoden 2007 standardiluonnoksessa [IEC 2007].



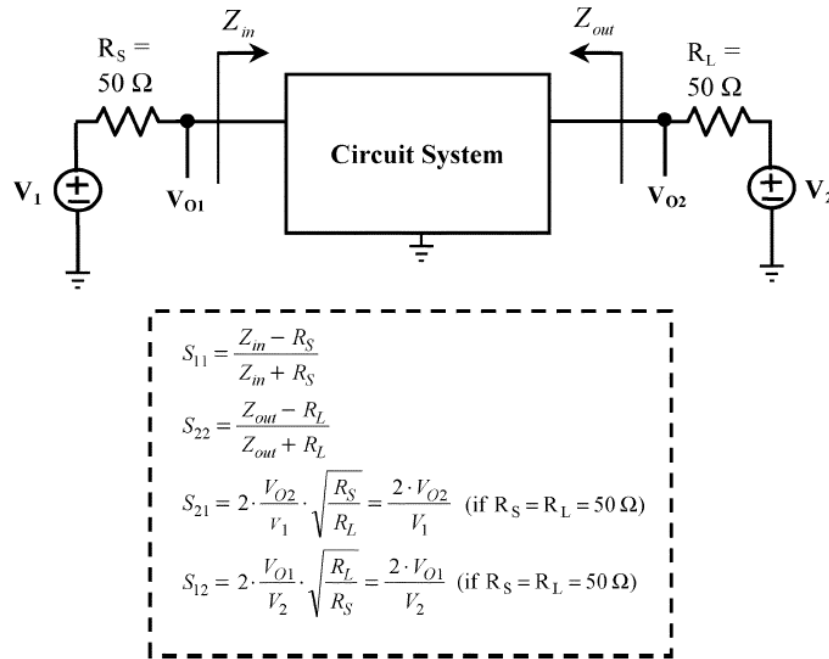
Kuva 4.1 – Siirtokonduktanssin  $G_{\text{sys}}$ [S] kuuden kuukauden stabiilisuus

Siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  ja sen laskennallinen standardiepävarmuus on laskettu viimeisimmästä mittauksesta, koska tällöin mittaajan kokemus ja sen tuoma systemaattisten virheiden tuntemus on ollut parhaimmillaan. Satunnaiset epävarmuustekijät pitkällä aikavälillä tulevat huomioitua, koska viimeisin mittaus mahtuu edellisten mittausten vaihteluiden sisälle. Käytettävän kalibrointijärjestelmän siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  tietyillä asetuksilla, järjestelmän kunnolla ja olosuhteilla on  $(4,943 \pm 0,006)\text{S}$ , kattavuuskertoimella  $k=2$ ). Siirtokonduktanssin  $G_{\text{sys}}$  suhteellinen epävarmuus on siis 1,2 %. Mittauksesta on poistettu käytetyn HP3458A:n kalibrointitodistuksen systemaattiset virheet. Epävarmuusarviossa on käytetty mittaussarjojen keskihajontojen lisäksi HP 3458:n kalibrointitodistuksen tyypin B epävarmuuksia.

## 4.2 Taajuusvastevirheen korjaus S-parametreilla

Piirianalysointorilla mitataan kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin S-parametrit (luku 3.5.2). Piiriin syötettävä tehollinen jännite saadaan

heijastuneen ja läpäisseen jänniteaallon summana [Pozar 1998]. Piirikaaviossa (Kuva 4.2) S-parametrien mittauksesta  $Z_{in}$  on  $50\Omega$ :n siirtojohdon kohtaama impedanssi (kohtion resistanssi noin  $2\Omega$ ).  $Z_{out}$  vastaavasti  $50\Omega$ :n siirtojohdon kohtaama impedanssi (kaapelin ominaisimpedanssi noin  $50\Omega$ ).  $V_1$  ja  $V_2$  ovat piirianalysaattorin mitaamat jännitteet ja  $V_{01}$  sekä  $V_{02}$  ovat heijastusrajapintojen jännitteet.

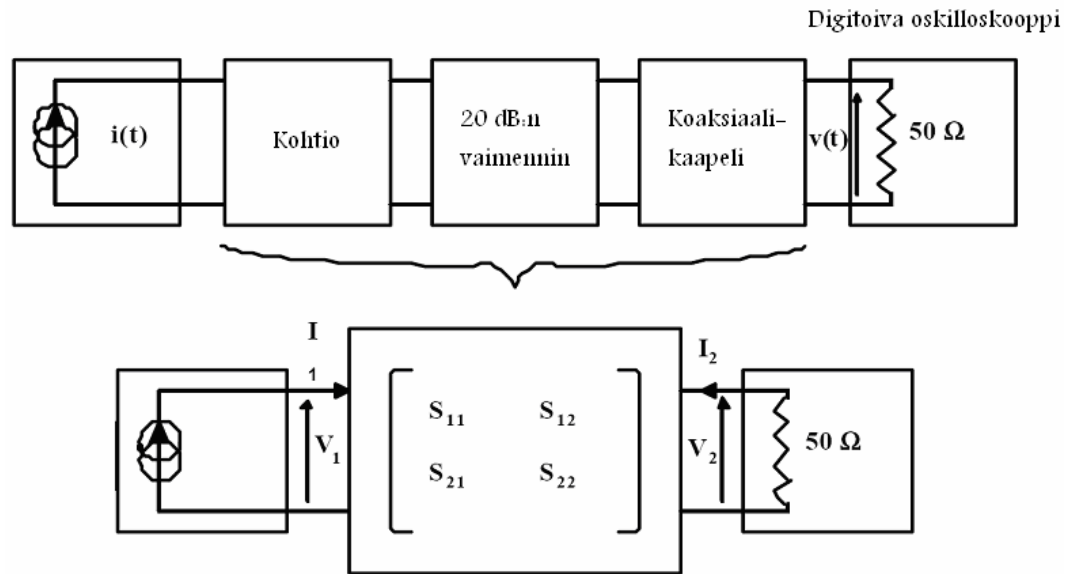


Kuva 4.2 – S-parametrien mittauksen piirikaavio [Lu 2005]

#### 4.2.1 S-parametreista siirtoadmittanssiin $Y_{sys}$

Koska kalibrointijärjestelmämme (Kuva 4.3) on vastaava kuin julkaisuissa [Ketelaere 2000][Vlietink 2000], voidaan piirianalysaattorilla mitattavat S-parametrit sijoittaa yhtälöön 4.1. Tällöin virheen aiheuttaa oskilloskoopin impedanssivaste  $Z_{50}(f)$  ja mittauksessa käytetyn kohtioadapterin taajuusvaste. Yhtälössä  $R_{in}$  on oskilloskoopin resistanssi ja  $R_1$  ja  $R_2$  ovat sovituseristansseja. Sovituseristanssit ovat piirianalysaattoreiden porttien lähettävissä ja vastaanottavissa piireissä (käytetään myös nimitystä sovitusimpedanssit).

$$I_1 = U_2 \left[ \frac{1}{2\sqrt{R_1 R_2}} \frac{1}{R_{in}} \left( \left( \frac{1-s_{11}}{s_{21}} \right) (R_{in} + R_2) - \left( \frac{s_{22}}{s_{21}} (1-s_{11}) + s_{12} \right) (R_{in} - R_2) \right) \right] \quad (4.1)$$



Kuva 4.3 –  $S$ -parametrien käyttäminen kalibrointijärjestelmässä [Vlietinc 2000]

Sijoitaessamme yhtälöön 4.1  $R_1=R_2=R_{in}=50 \Omega$ , saadaan yksinkertaisempi muoto, jolla voidaan laskea siirtoadmittanssi  $Y_{sys}$  (yhtälö 4.2).

$$I_1 = U_2 \cdot \frac{1}{50} \cdot \left( \frac{1-s_{11}}{s_{21}} \right) \rightarrow Y_{sys} = \frac{I_1}{U_2} = \frac{1}{50} \cdot \left( \frac{1-s_{11}}{s_{21}} \right) \quad (4.2)$$

Siirtoadmittanssin  $Y_{sys}$  yhtälön 4.2 paikansapitävyys on tarkistettu perustuen  $S$ -parametrien määritelmiin [Kytönen 2007][Silvonen 2007] ja toisaalta myös käyttämällä  $Y$ -parametrien ja  $S$ -parametrien muunnoskaavoja [Silvonen 2005].

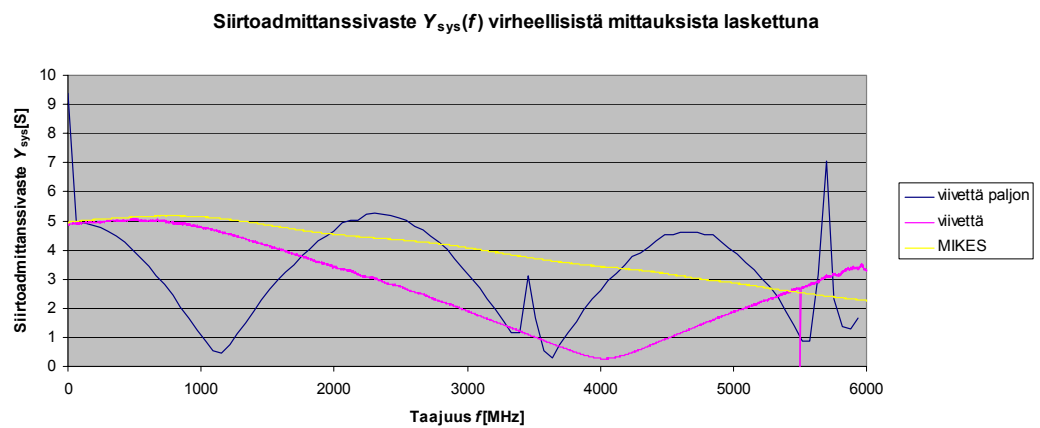
Kun olemme mitanneet tekijät  $S_{11}(f)$ ,  $S_{21}(f)$  ja  $Z_{50}(f)$ , lasketaan siirtoadmittanssivaste  $Y_{sys}(f)$  (yhtälö 4.3). Yhtälössä tekijän  $R_{in}$  tilalle on sijoitettu oskilloskoopin impedanssivaste  $Z_{50}(f)$ .

$$Y_{sys}(f) = \frac{1-S_{11}(f)}{Z_{50}(f) \cdot S_{21}(f)} \quad (4.3)$$



### 4.2.2 Siirtoadmittanssivasteen $Y_{\text{sys}}(f)$ tarkastaminen

Kun siirtoadmittanssivaste  $Y_{\text{sys}}(f)$  on laskettu mittaustuloksista, tarkistetaan sen stabiilius aikaisemmin laskettuun vastaavaan verrattuna. Yksi merkittävä virhe voi aiheutua heijastusvaimennuksen  $S_{11}$  viiveestä. Piirianalysaattoria käytettäessä tehdään tarvittaessa viiveen korjaus. Jos sitä ei tehdä, saattaa heijastusvaimennuksen  $S_{11}$  vaihekulma muuttua  $180^\circ$  (Kuva 4.4 ”viivettä”) tai enemmän (Kuva 4.4 ”viivettä paljon”) ja aiheuttaa siirtoadmittanssin  $Y_{\text{sys}}$  menemiseen nolleen kerran tai useasti.



Kuva 4.4 –  $S_{11}$  viiveen vaikutus siirtoadmittanssivasteeseen  $Y_{\text{sys}}(f)$

Paikoitellen siirtoadmittanssivaste  $Y_{\text{sys}}(f)$  on lähellä tulosta, joka saadaan kun viivettä kompensoidaan oikeaksi katsottu määrä (Liite D – Piirianalysaattorin kalibrointi ja kalibrointirajapinta).

### 4.2.3 Virran $i_n(t_n)$ laskenta

Oskilloskoopilta mitattavan aikatazon jännitteen  $u_n(t_n)$  kertominen siirtokonduktanssilla  $G_{\text{sys}}$  kertoo aikatazon ESD-virran  $i_n(t_n)$  ilman taajuustason korjausta. Jos taajuustason korjausta ei tehdä kuten luonnos [IEC 2005] suosittelee, täytyy luonnoksessa olevien vaatimusten kalibrointijärjestelmälle toteutua (luku 3.3).

Jos ESD-impulssi korjataan taajuustasossa joudutaan käyttämään FFT-muunnosta. ESD-impulssia mitataan siten, että oskilloskoopin jännitemittaus ehtii asettua

mahdollisimman lähelle nollaa. FFT-muunnos on määritetty vain jaksollisille funktioille. Siten jännitteessä esiintyvä epäjatkuvuus kuten mittauspisteiden loppuminen tai katkaisu aiheuttaa korkeita taajuuksia laskettavaan ESD-impulssin virtaan.

Taajuustason jännite  $U_n(f)$  saadaan oskilloskoopin jännitemittauksesta  $u_n(t_n)$  FFT-muunnoksella. Kertomalla  $Y_{\text{sys}}(f)$  ja  $U_n(f)$  saadaan virta  $I_{\text{sys}}(f)$ , joka on ESD-kohtioon syötetty virta taajuustasossa. Kun  $I_{\text{sys}}(f)$  muutetaan aikatasoon, saadaan halutut virtapisteet  $i_n(t_n)$  (yhtälö 4.4). Virtapisteiden avulla voidaan laskea myös nousuaika  $t_r$ .

$$i_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} \left( \sum_{n=0}^{N-1} u_n \cdot e^{-2\pi i \frac{n}{N} f} \cdot Y_{\text{sys}}(f) \right) \cdot e^{i2\pi \frac{n}{N} f} \quad (4.4)$$

### 4.3 Epävarmuus

Epävarmuus määritetään standardiluonnoksen [IEC 2005] perusteella suureille huippuvirta  $I_p$ , nousuaika  $t_r$ , virta  $I_{30}$  hetkellä 30 ns,  $I_{60}$  virta hetkellä 60 ns,  $W$  virta välillä 2 ns – 60 ns (standardissa [IEC 1995] ja luonnoksessa [IEC 2007] ei ole suuretta  $W$ ). Tässä luvussa kuvataan menetelmä miten halutut suureet ja niiden epävarmuudet voidaan laskea.

Siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  standardiepävarmuus saadaan  $S_{11}(f)$  ja  $S_{21}(f)$  mittauksista ja oskilloskoopin impedanssivasteen  $Z_{50}(f)$  mittauksesta. Mittaustuloksista termeille lasketaan standardiepävarmuus tilastollisten (tyyppi A) ja muiden epävarmuustekijöiden (tyyppi B) neliösumman neliöjuurena.

#### 4.3.1 Epävarmuus ilman taajuusvastevirheen korjausta

Taajuusvastevirheen korjauksesta saatuja virta-arvoja  $i_n$  kannattaa verrata vastaaviin siirtokonduktanssilla  $G_{\text{sys}}$  laskettuihin virta-arvoihin  $i_n$ . Jos ero on

merkittävä eli esimerkiksi yli 1%, niin tällöin taajuustason korjauksen tarpeellisuutta on syytä harkita. Epävarmuusarvio ilman taajuusvastevirheen korjausta on huomattavasti yksinkertaisempi, koska laskenta ei sisällä Fourier-muunnoksia (FFT, IFFT). Tällöin kalibrointijärjestelmän taajuusvasteen systemaattinen virhe jää korjaamatta, joka pitää ottaa huomioon epävarmuusarviossa. Systemaattisesta virheestä lisää luvussa 4.3.2.

### 4.3.2 Epävarmuus taajuusvastevirheen korjauksella

#### 4.3.2.1 Siirtoadmittanssivasteen epävarmuus $\Delta Y_{\text{sys}}(f)$

Siirtoadmittanssivasteen epävarmuus  $\Delta Y_{\text{sys}}(f)$  saadaan tekijöiden  $S_{11}(f)$ ,  $S_{21}(f)$  ja  $Z_{50}(f)$  standardiepävarmuuksista, jotka ovat kerrottu kattavuuskertoimella (esimerkiksi  $k=2$ ). Epävarmuus  $\Delta Y_{\text{sys}}(f)$  (yhtälö 4.5) voidaan laskea osittaisderivoimalla (Liite B – Yhtälöitä.). Virheiden välttämiseksi  $\Delta Y_{\text{sys}}(f)$  kannattaa laskea tarkoitukseen sopivalla ohjelmalla (esimerkiksi GUM Workbench). Ohjelmaan syötetään mittaustulokset ja niiden epävarmuudet sekä yhtälö 4.5.

$$MAG(Y(f)) = \sqrt{\frac{(1 - X_{S_{11}})^2 + (Y_{S_{11}})^2}{(Z_{50} \cdot X_{S_{21}})^2 + (Z_{50} \cdot Y_{S_{21}})^2}} \quad (4.5)$$

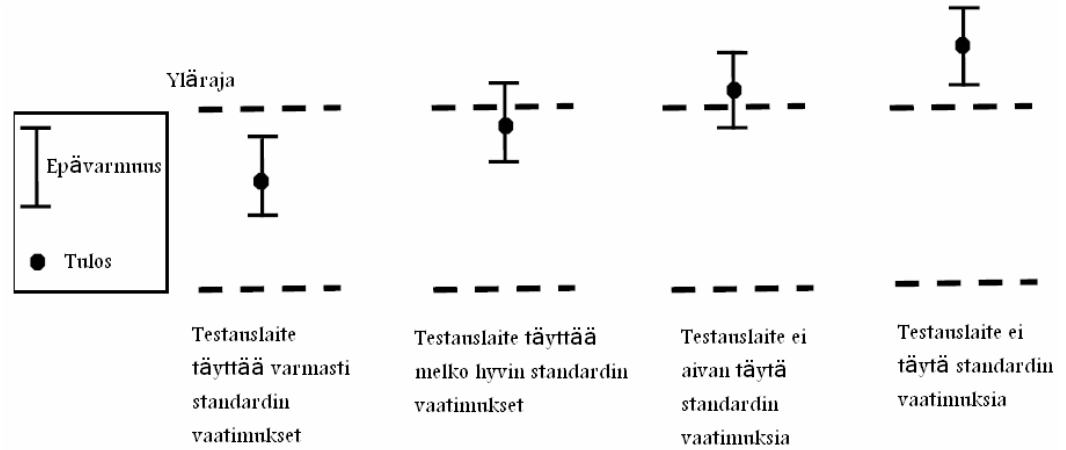
Yhtälöllä 4.5 lasketaan siirtoadmittanssivaste  $Y_{\text{sys}}(f)$ . Yhtälö sijoitetaan laskentaohjelmaan, johon määritetään kompleksilukujen suuruudelle ja kulmalle epävarmuudet. Yhtälössä 4.5 tekijät  $X_{S_{11}}$ ,  $X_{S_{21}}$  vastaavat mitattujen S-parametrien reaaliosia ja tekijät  $Y_{S_{11}}$ ,  $Y_{S_{21}}$  vastaavia imaginääriosia.

Esimerkiksi, kun mitatuille S-parametreille epävarmuus on 0,2 dB ja oskilloskoopin impedanssivaste on  $50\Omega \pm 2\%$  (mittaus MIKES 14.3.2007) saadaan (GUM Workbench-ohjelmalla):

$$\text{Siirtoadmittanssin epävarmuus } \Delta Y_{\text{sys}} = 3,5\%$$

#### 4.3.2.2 Virtojen $I_p$ , $I_{30}$ , $I_{60}$ , ja nousuajan $t_r$ epävarmuus

Virta  $i_n(t_n)$  lasketaan (luku 4.2.3) väliltä 0-60ns. Saatuja virtoja verrataan standardin [IEC 1995] vaatimukseen huippuvirralla  $I_p$ , virralla  $I_{30}$  ja virralla  $I_{60}$ . Virroille lasketuista epävarmuuksista nähdään pysyvätkö virrat standardin epävarmuusrajojen sisällä (Kuva 4.5).



Kuva 4.5 – Epävarmuudet standardirajojen sisällä? [IEC 2005]

Virran  $i_n(t_n)$  epävarmuutta approksimoidaan Monte Carlo-menetelmällä (Liite E – Monte Carlo-menetelmä). Monte Carlo-menetelmässä termiä  $u_n(t_n)$  satunnaisesti vaihdellaan sen epävarmuusrajojen sisälle satunnaisesti ja loppujen lopuksi saadaan selville  $i_n(t_n)$  epävarmuus.

Nousuaika  $t_r$  voidaan laskea yhtälön 4.6 mukaisesti. Jos halutaan laskea virran nousuaika, niin huippujännitteen  $u_{peak}$  sijaan sijoitetaan huippuvirta  $i_{peak}$ . Epävarmuuden  $\Delta u_{peak}$  sijaan vastaavasti sijoitetaan  $\Delta i_{peak}$ .

$$t_r = t_n((u_{peak} \pm \Delta u_{peak}) \cdot 0,9) \pm \Delta t_n - t_n((u_{peak} \pm \Delta u_{peak}) \cdot 0,1) \pm \Delta t_n \quad (4.6)$$

Yhtälössä 4.6 kerrotaan 0,9:llä jännitehuippu  $u_{peak}$ , jonka avulla mittaustuloksista haetaan sitä vastaava diskreetti hetki  $t_{n\_90\%}$ . Tästä hetkestä vähennetään vastaava diskreetti hetki  $t_{n\_10\%}$ . Nousuajan epävarmuus voidaan laskea (yhtälö 4.7), jossa  $t_n$ :t on kertaalleen derivoitu.

$$\Delta t_r = \Delta t_n \cdot i_n((u_{peak} \pm \Delta u_{peak}) \cdot 0,9) - \Delta t_n \cdot i_n((u_{peak} \pm \Delta u_{peak}) \cdot 0,1) \quad (4.7)$$

Laskettua nousuaikaa  $t_r$  ja sen epävarmuutta  $\Delta t_r$  verrataan standardin asettamiin rajoihin, kuten aikaisemmin esitettyjä virtaparametreja.

## 5 Tulokset

### 5.1 Verifiointi

Koska oskilloskooppi ja kohtio pitäisi verifioida vuosittain niiden valmistajien spesifikaatioiden perusteella, on suositeltavaa verifioida myös kalibrointijärjestelmä vuosittain. Verifiointiin käytettävä perusmittaus on siirtokonduktanssin  $G_{\text{sys}}$  laskentaan tarvittava tasavirtamittaus (luku 3.5.1). Toisen mittauksen voi tehdä piirianalyssaattorilla, jonka perusteella lasketaan siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}$  ja todetaan sen stabiilius verrattuna aikaisempaan vastaavan saman piirianalyssaattorin mittaukseen pohjautuvaan siirtoadmittanssiin  $Y_{\text{sys}}$ . Työssä kuvatut taajuusvastemittaukset ja tasavirtamittaukset toistamalla ja laskemalla niiden jäljitettävät epävarmuudet (luku 4) kalibrointijärjestelmä saadaan kalibroitua ja verifioitua.

### 5.2 Referenssijärjestelmän kehittäminen

Referenssijärjestelmään (luku 2.3) verrattuna kalibrointijärjestelmässä ei enää käytetä useisiin pulsseihin perustuvaa ohjelmallista näytteenottotaajuuden parantamista, koska käytettävän oskilloskoopin taajuuskaista on noin nelinkertainen verrattuna edellisessä kalibrointijärjestelmässä käytettyyn. Impulssia ei suodateta 1 GHz:n taajuuskaistaan vaan käytetään 6 GHz:n taajuuskaistaa, koska muun muassa vuoden 2005 standardiluonnoksessa [IEC 2005] on esitetty 2 GHz:n taajuuskaistan vähimmäisvaatimus.

#### 5.2.1 Laitteisto

ESD-kohtio ja 20 dB:n vaimennin ovat samat kuin edellisessä kalibrointijärjestelmässä. Oskilloskooppi (luku 3.1.6) ja kaapeli (luku 3.1.4) ovat

uusittu ja kalibrointijärjestelmään on kehitetty kohtioadapteri, jonka avulla pystytään mittaamaan koko kalibrointijärjestelmän taajuusvaste (luku 3.5).

### 5.2.2 Siirtokonduktanssi $G_{\text{sys}}$

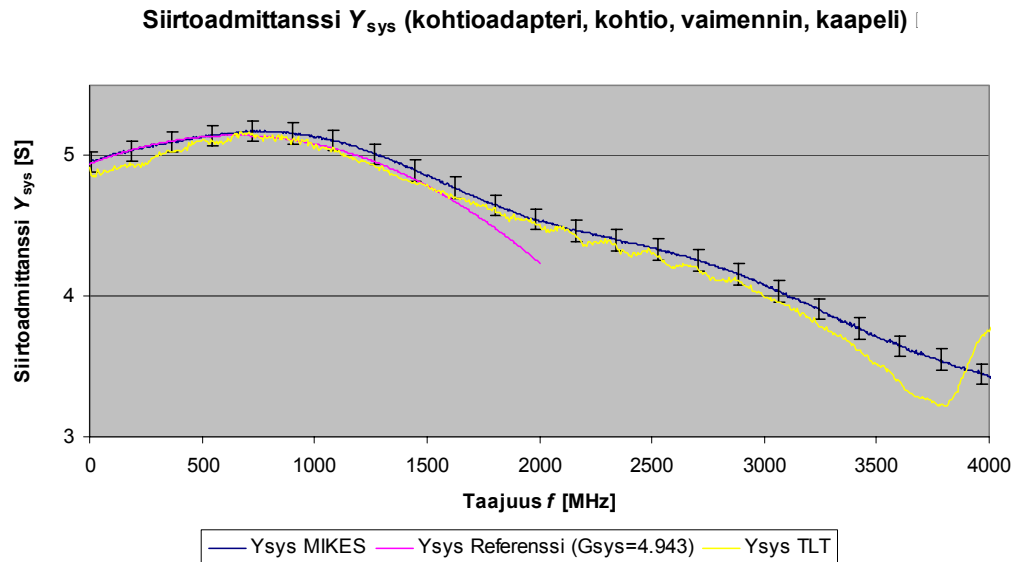
Referenssijärjestelmässä (luku 2.3) jakosuhte eli työssä siirtokonduktanssia  $G_{\text{sys}}$  vastaava arvo, laskettiin jännitejakosuhteen ja kohtiosta mitatun resistanssin perusteella. Kalibrointijärjestelmässä mitataan suoraan sisääntuleva tasavirta ja oskilloskoopilla näkyvä tasajännitte ja lasketaan siirtokonduktanssi  $G_{\text{sys}}$  (luku 4.1), kuten standardissa [IEC 1995] ohjeistetaan (luku 3.5.1).

### 5.2.3 Siirtoadmittanssivaste $Y_{\text{sys}}(f)$

Referenssijärjestelmässä (luku 2.3) taajuusvastevirheen korjauskerroin perustui vaimentimen (luku 3.1.3) ja kohtion (luku 3.1.2) erillisiin taajuusvastemittauksiin. Ilman kohtioadapteria ei voitu mitata kohtion, vaimentimen ja kaapelin taajuusvastetta. Tässä työssä taajuusvaste on mitattu siten, että kohtioadapteri ja kohtio, vaimennin ja kaapeli ovat kytkettyinä toisiinsa (luku 3.5). Mittauksia on toistettu Tietoliikennelaboratoriossa kohtioadapteria kehitettäessä. Toistettujen mittauksien perusteella mittalaite ja kohtioadapteri, kohtio, vaimennin ja kaapeli ovat olleet stabiileja. Stabiiliuden ansiosta ESD-testauslaitteen kalibrointimittauksiin voidaan luottaa paremmin.

Kalibrointijärjestelmän kohtioadapterin, kohtion, kaapelin ja vaimentimen mittauksista laskettua siirtoadmittanssia  $Y_{\text{sys}}$  on vertailtu (Kuva 5.1). Vertailu taajuusalueella 150 kHz – 4000 MHz osoittaa, että referenssijärjestelmän (luku 2.3) korjauskerroin pysyy MIKESsin mittauksen epävarmuusrajoissa alle 1 GHz:n taajuusalueessa. Referenssijärjestelmän taajuusvastevirheen korjauskertoimen taso perustuu laskettuun siirtokonduktanssiin  $G_{\text{sys}}$  (luku 4.1) ja referenssijärjestelmän polynomisovitukseen. Mittaus osoittaa sen, että TLT-laboratorion piirinanalysaattorimittauksista laskettu siirtoadmittanssivaste  $Y_{\text{sys}}(f)$  ei pysy vastaavan MIKES mittauksiin perustuvan siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  epävarmuusrajoissa. Matalilla taajuuksilla siirtoadmittanssin  $Y_{\text{sys}}$  pitäisi vastata

tasavirralla mitattua siirtokonduktanssia  $G_{\text{sys}}$  ja sekään ei pidä paikkaansa TLT-laboratorion mittauksessa. Mittaus MIKES vastaa tasavirtamittauksia.



Kuva 5.1 – Siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  vertailu

Kalibrointijärjestelmän siirtoadmittanssin  $Y_{\text{sys}}$  etu verrattuna referenssijärjestelmän korjauskertoimeen on sen sisältämät kohtion ja vaimentimen välinen epäsovitus, kohtion ja kaapelin välinen epäsovitus sekä kaapeli.

## 5.2.4 Toistettavuus

Yksinkertaisuus parantaa toistettavuutta:

- Koska kohtioadapterin valmistaminen sisältää vähän vaiheita ja sen rakenne on yksinkertainen, on sen uusiminen toistettavasti helppoa. Valmistamisen helppouteen kuuluvat kohtioadapterin vähäiset materiaalikustannukset (alle 100 €) ja sen valmistaminen ei vaadi erityisosaamista tai erikoislaitteita. (luku 2.5.2)
- Kohtioadapterin yksinkertainen rakenne lisää sen käytön helppoutta ja rakenteen edelleen kehittämistä.



- S-parametreista laskettava siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}$  (Liite A – Siirtoadmittanssi MATLABilla.) perustuu S-parametrien määritelmiin eikä sisällä välissä muunnoksia muihin porttiparametreihin. Välivaiheiden puuttuminen vähentää laskennan systemaattisten virheiden mahdollisuutta. Lisäksi laskenta-algoritmia on helppo ymmärtää ja edelleen kehittää.

#### 5.2.4.1 Vertikaaliresoluution toistettavuus

Mittausalueiden kiinnittäminen (luku 3.1.6) varmistaa, että oskilloskoopin mittausalueet eivät eri skaalauksesta johtuen vaihtelee eri mittauskerroilla. Mittausalueiden muuttaminen vaikuttaa oskilloskoopin sisäiseen kytkentään. Skaalauksen kiinnittämisellä vakioidaan oskilloskoopin jännitemittauksen vertikaaliresoluutio.

#### 5.2.4.2 Liitoksien kireys toistettavammaksi

N-liittimiin tehtiin urat, jotta N-liittimet voidaan momenttiavaimella kiristää toistettavammin. Referenssijärjestelmässä (luku 2.3) liitokset kiristettiin käsikireyteen. Kohtioadapterin keskijohtimen jousen kontaktiresistanssi saadaan toistettavammaksi momenttiruuvimeisselillä. (luku 3.1.8)

#### 5.2.4.3 N-liitokset tasavirtamittauksissa

Tasavirtamittaukset (luku 3.5.1), ja kontaktiresistanssimittaukset (luku 3.4.1) voidaan toistaa referenssijärjestelmää (luku 2.3) paremmin nelijohtomittausadapterin avulla. Referenssijärjestelmän jakosuhtemittauksessa on aikaisemmin liitetty ESD-kohtioon mittakärjellä ja oskilloskoopin jännitettä on mitattu BNC-liitoksella. (luku 3.1.8)

## 5.3 Kalibrointijärjestelmän kalibrointi

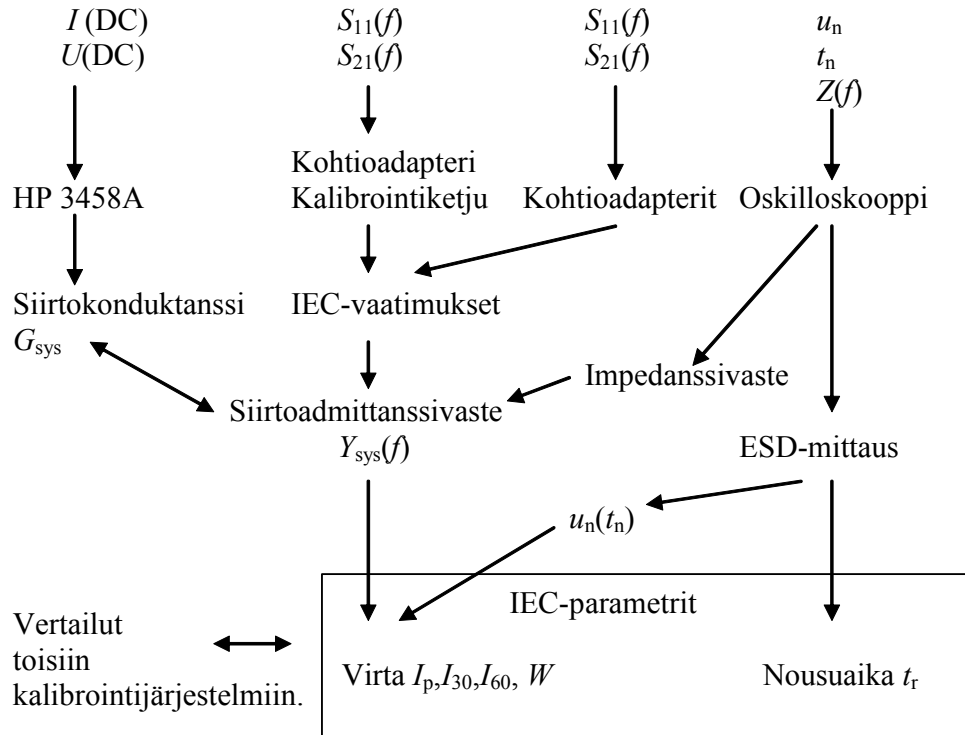
Kalibrointijärjestelmän akkreditoidulla kalibroinnilla saavutetaan kansainvälinen vertailukelpoisuus. Vertailukelpoisuus edellyttää jäljitettävyyttä kansalliseen mittanormaaliin ja laadukasta epävarmuusarviota mitattaville suureille.

Referenssijärjestelmässä (luku 2.3) oskilloskoopilta mitattavan jännitteen  $u_n$  ja siirtoadmittanssin  $Y_{\text{sys}}$  epävarmuustekijät olivat sekaisin. Standardin [EN 1998] ja akkreditointilaboratorioiden epävarmuusmäärittämisessä käyttämän julkaisun [EA 1999] perusteella epävarmuustekijät pitäisi sijoittaa käytettävään yhtälöön sekä sitä kautta arvioida laskennallinen epävarmuus. (luku 4.3).

### 5.3.1 Jäljitettävyys

”Jäljitettävyys tarkoittaa katkeamatonta kalibrointien ketjua käytetystä mittausjärjestelmästä mittanormaaleihin tai kansainvälisiin vertailuihin.” [Aro 1996] Kalibrointijärjestelmän jäljitettävyyskaavio (Kuva 5.2) sisältää tarvittavat mittaukset ja niiden väliset keskinäiset vertailusuhteet ja laskennalliset suhteet.

## Jäljitettävyys: MIKES kansallinen mittanormaalilaboratorio



Kuva 5.2 – Jäljitettävyyskaavio

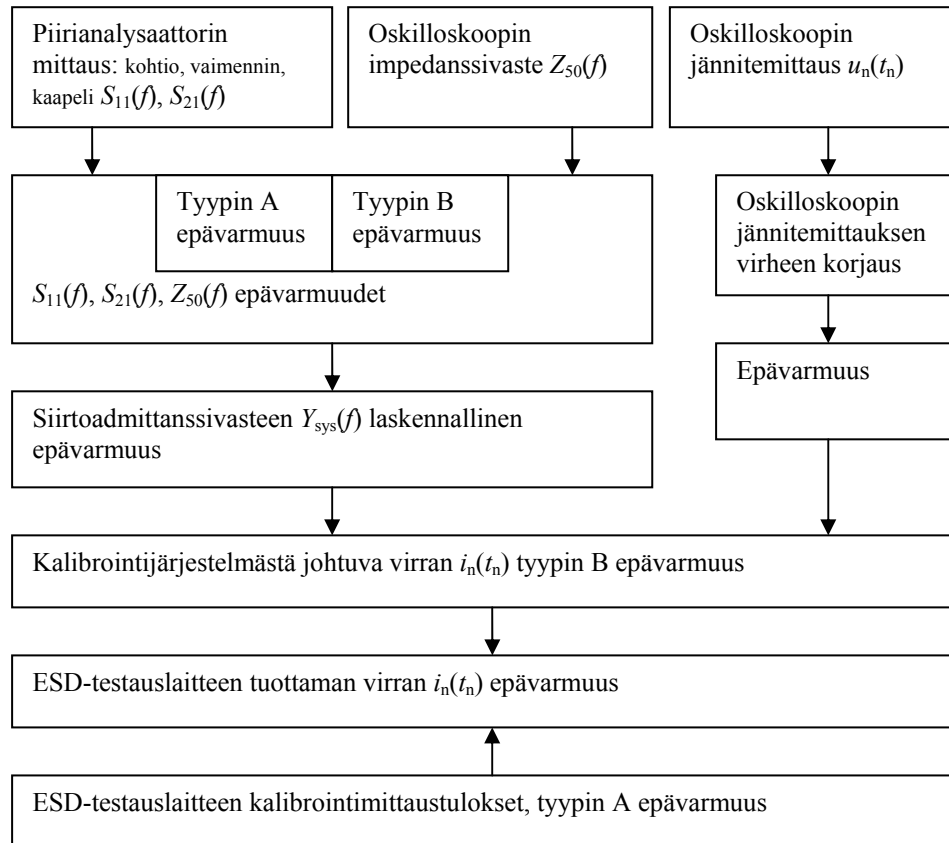
Jäljitettävyyskaaviossa ovat S-parametrit  $S_{11}(f)$ ,  $S_{21}(f)$  ja oskilloskoopin aikatasossa mitaama jännite  $u_n(t_n)$ . Taajuusvastekorjauksessa oskilloskoopin jännite  $u_n$  muunnetaan FFT:llä taajuustasoon. Taajuustason jännite  $U_n$  kerrotaan siirtoadmittanssivasteella  $Y_{\text{sys}}(f)$ . Tästä saatava virta  $I_{\text{sys}}(f)$  muutetaan takaisin aikatazon signaaliksi käänteisellä Fourier-muunnoksella (IFFT). Jäljitettävä siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}(f \approx 300 \text{ kHz})$  tarkistetaan vertaamalla sitä tasavirralla mitattuun jäljitettävään siirtokonduktanssiin  $G_{\text{sys}}$ .

### 5.3.2 Epävarmuus

Kalibrointijärjestelmän epävarmuusarviota ei kannata tehdä yksittäiselle ESD-testauslaitteelle, koska niiden impulssimuodot ja toistettavuus vaihtelevat tyypistä ja laitteesta riippuen. Jos yleinen epävarmuusarvio halutaan tehdä, yksi mahdollisuus on käyttää vuoden 2005 standardiluonnoksen matemaattista mallia simuloimaan ESD-impulssia [IEC 2005]. Monte Carlo-menetelmä voidaan

toteuttaa esimerkiksi MATLABilla. Työssä on koekäytetty Monte Carlo-menetelmän käyttö epävarmuusarviossa (Liite E – Monte Carlo-menetelmä).

Epävarmuuskaavio (Kuva 5.3) ja epävarmuusbudjetti (Taulukko 5.1) antavat kokonaiskuvan epävarmuuksista.



Kuva 5.3 – Epävarmuuskaavio

Käytettävien mittalaitteiden akkreditoidussa kalibrointilaboratoriossa tehdyn kalibroinnin pitää olla voimassa. Kalibrointitodistuksesta saadaan mittalaitteiden systemaattiset virheet ja tyypin B epävarmuudet.

Siirtokonduktanssin  $G_{sys}$  ja 300 kHz:n siirtoadmittanssin  $Y_{sys}$  ero pysyy epävarmuusrajojen puitteissa

$$Y_{sys}(300 \text{ kHz}) = 4,945 \text{ S, epävarmuus } (k=2) 3,5 \%$$

$$G_{sys} = 4,943 \text{ S, epävarmuus } (k=2) 1,2 \%$$

Standardin [IEC 1995] ESD-parametrien epävarmuudet riippuvat ESD-sietokvyn ESD-testauslaitteen epävarmuudesta. Tästä syystä ESD-parametrien vertailukelpoinen epävarmuus voidaan laskea vasta, kun mittausten perusteella tunnetaan ESD-testauslaitteen epävarmuus. Epävarmuuslaskennassa käytetään epävarmuusbudjetissa esitettyjä parametreja. Epävarmuusbudjetista puuttuu luotettava oskilloskoopin impedanssivasteen  $Z_{50}(f)$  epävarmuus ja kokonaan oskilloskoopin mittausten epävarmuudet.

*Taulukko 5.1 – Epävarmuusbudjetti*

	Epävarmuus $k=2$	Epävarmuusjakauma	Kommentit
$U_{50}(f = 0 \text{ Hz})$	0.06 %	Normaalijakauma	suurjännitelaboratorio
$I_{\text{sys}}(f = 0 \text{ Hz})$	0.002 %	Normaalijakauma	suurjännitelaboratorio
$G_{\text{sys}}(f = 0 \text{ Hz})$	0.12 %		laskennallinen (GUM)
$S_{11}(f < 4 \text{ GHz})$	0.2 dB	Normaalijakauma	MIKES kalibroitilaboratorio
$S_{21}(f < 4 \text{ GHz})$	0.2 dB	Normaalijakauma	MIKES kalibroitilaboratorio
$Z_{50}(f < 4 \text{ GHz})$	1 $\Omega$	Suorakulmainen	valmistajan spesifikaatio
$Y_{\text{sys}}(f)$	3,5 %		laskennallinen (GUM)
$u_n$	kalibointi puuttuu		MIKES kalibroitilaboratorio
$t_n$	kalibointi puuttuu		MIKES kalibroitilaboratorio

Taulukossa S-parametrien  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  epävarmuudet perustuvat MIKES-kalibointiin (luku 3.5.2). Oskilloskoopin impedanssin  $Z_{50}$  epävarmuus on valmistajan spesifikaatio [LeCroy 2003]. Siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  ja siirtokonduktanssin  $G_{\text{sys}}$  epävarmuudet on laskettu epävarmuuslaskentaohjelmalla (GUM Workbench, luku 4.3). Taulukon epävarmuuksista lasketaan kalibointijärjestelmän tilastollinen epävarmuus. ESD-testauslaitteen kalibroinnissa käytettävä kalibointijärjestelmän tilastollinen epävarmuus sisältää kalibointijärjestelmän satunnaiset epävarmuustekijät ja ei-tilastolliset epävarmuustekijät.

## 6 Yhteenveto

### 6.1 Tavoitteiden toteutuminen

Työssä dokumentoidaan menetelmä, joka voidaan toistaa kalibrointijärjestelmää kalibroitaessa (luvut 3 ja 4). Kalibrointia ei projektiaikataulussa ehditty tehdä. Dokumentoitavan menetelmän osia ovat mitattavien ESD-parametrien epävarmuuksien laskeminen, mittausten jäljitettävyyden toteuttaminen ja tarvittaessa taajuusvastevirheen korjaus. Kalibrointijärjestelmä on valmis kalibrointitoimintaan, kun kohtio, vaimennin, kaapeli ja oskilloskooppi saadaan kalibroitua MIKESillä.

Toinen tavoite oli kalibrointijärjestelmän yksinkertaisuus ja dokumentointi, joka mahdollistaa kalibrointijärjestelmän toistettavuuden, helppokäyttöisyyden, edelleen kehittämisen ja kalibroinnin toistettavan uusimisen ja samalla kalibrointijärjestelmän verifiointin. Yksinkertaistamisen ja dokumentoinnin keskeiset tulokset ovat kohtioadapteri, taajuusvastekorjaus ja Monte Carlo-menetelmä.

### 6.2 Johtopäätökset

Työssä kalibrointijärjestelmää kehitettiin kokeilemalla, simuloimalla, mittaamalla ja laskemalla. Kalibrointijärjestelmä on kehittynyt merkittävästi.

Kalibrointijärjestelmän kehittämisen keskeiset tulokset (luku 5) ovat:

- kohtioadapterin kehittäminen (luku 2.5.2),
- taajuusvastevirheen korjaus (luku 4.2),
- toistettavuuden parantaminen yksinkertaisilla ja dokumentoiduilla menetelmillä (luvut 3 ja 4),
- kalibrointi- ja verifiointimenetelmä (luvut 3 ja 4),

- jäljitettävyys (kalibrointien jälkeen)
- epävarmuuslaskenta (luku 4.3)

Kehitettyä kohtioadapteria voidaan käyttää liityttäessä vastaavan tyyppisiin Jon Barth-kohtioihin. Väite, että heijastuksettoman siirtojohdon voi tehdä käyttäen periaatteena siirtojohdon pientä pituutta  $l$  verrattuna siirrettävän signaalin aallonpituuteen  $\lambda$  ominaisimpedanssien  $Z_0$  sovittamisen sijaan, ei täysin päde. Siirtojohtojen sovittaminen fyysisiltä mitoiltaan tai impedanssiltaan on hyödyllistä, vaikka siirtojohto olisi signaalin aallonpituuteen nähden lyhyt.

Kohtioadapteri perustuu N-liittimeen, jota voidaan käyttää pienellä viilauksella liityttäessä kohtioon. Kohtioadapterin (N2R2) taajuuskaista on 3 GHz, vaikka tavoitteena pidettiin IEC-standardin luonnoksen ehdottamaa 4 GHz:n taajuuskaistaa. Koska IEC-standardin mukaisen ESD-testauslaitteen tuottama ESD-impulssi [EMC-Partner 1997] ei sisällä merkittävästi yli 2 GHz:n taajuuksia, voidaan olettaa, että kohtioadapterin 3 GHz:n taajuuskaista ei aiheuta ongelmia tämän ESD-testauslaitteen kalibroinnissa. Jos kalibroitavassa ESD-testauslaitteen tuottamassa ESD-impulssissa on merkittävästi yli 2 GHz:n taajuuksia, voidaan harkita työssä kehitettyä taajuusvasteeltaan laajakaistaisempaa kohtioadapteria (N-uros-adapteri) kalibrointijärjestelmän kalibroinnissa.

Taajuusvastevirheen korjauskerroin lasketaan piirianalyssaattorilla mitatuista kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin S-parametreista ja oskilloskoopin impedanssivasteesta  $Z_{50}(f)$ . Ongelmana taajuusvastevirheen korjauksen käytössä ovat Fourier-muunnokset (FFT, IFFT) ja muut tarvittavat tietokonealgoritmit. Fourier-muunnoksien ja muiden tietokonealgoritmien epävarmuusarviointi ei onnistu ilman approksimointia. Approksimoinnissa voidaan käyttää työssä koekäytettyä Monte Carlo-menetelmää (Liite E – Monte Carlo-menetelmä).

ESD-impulssin virta  $i_n(t_n)$  ilman taajuusvastevirheen korjausta saadaan kertomalla oskilloskoopilla mitattu jännite siirtokonduktanssilla  $G_{\text{sys}}$ . Vertailuarvoksi lasketaan taajuusvastekorjattu ESD-impulssin virta. Jos nämä virta-arvot eroavat

toisistaan kalibroinnin vaatimuksiin nähden liikaa, kannattaa harkita taajuusvastekorjauksen käyttöä. Taajuusvastevirheen suuruus arvioidaan ja otetaan huomioon epävarmuusarviossa käytettäessä siirtokonduktanssia  $G_{\text{sys}}$ .

Oskilloskoopin 6 GHz:n taajuuskaistan ansiosta sisältää ESD-impulssin 0,5 ns:n nousuaika teoriassa vain noin 1% systemaattisen virheen. Mittausten perusteella 1 GHz:n ja 6 GHz:n taajuuskaistojen ero ESD-impulssin nousujan  $t_r$  mittaukseen on noin 2%. Eli uudella oskilloskoopilla [LeCroy 2003] saavutettava epätarkkuuden vähennys nousujan  $t_r$  mittaukseen on noin 2%.

Yksittäisen ESD-testauslaitteen epävarmuutta ei määritellä tässä diplomityössä, koska eri ESD-testauslaitteet poikkeavat toistettavuudeltaan ja impulssimuodoltaan toisistaan. ESD-testauslaitteen kalibroinnin epävarmuusarviota tehtäessä käytetään oskilloskoopin kalibroinnin ja kohtion, vaimentimen ja kaapelin kalibroinnin epävarmuuksia (tyypin B epävarmuus). Lisäksi otetaan huomioon käytettävän ESD-testauslaitteen tuottamien impulssien ja muiden satunnaisten tekijöiden aiheuttama keskihajonta (tyypin A epävarmuus). Epävarmuusarvio tehdään ESD-parametreille, joita ovat virrat  $I_p$ ,  $I_{30}$ ,  $I_{60}$  ja nousuaika  $t_r$ .

### 6.3 Tulevaisuus

Jäljitettävyyden toteutumiseksi kalibroidaan oskilloskooppi ja kehitetty kohtioadapteri sekä kohtio, vaimennin ja kaapeli. Kalibroidulla järjestelmälle lasketaan ESD-parametrien epävarmuudet. Näitä epävarmuuksia käytetään ESD-testauslaitteiden kalibroinneissa ei-tilastollisina epävarmuustekijöinä (tyypin B epävarmuus).

Kansainvälinen vertailukelpoisuus varmistetaan vertaamalla mittaustuloksia, jotka on mitattu samalla ESD-testauslaitteella eri maiden kansallisissa mittanormaalilaboratorioissa.



Kalibroitijärjestelmän käyttökelpoisuus ennen kalibrointia varmistetaan voimassa olevan ESD-sietokyvyn testaukseen liittyvään IEC-standardiin 61000-4-2 perustuen. Tarvittaessa kalibroititoimenpiteet kalibroitijärjestelmälle uusitaan.

## Lähteet

- [Agilent 2004] Agilent Technologies, Technical Specifications PNA Series Network Analyzers E8356A, E8357A, and E8358 A, 5989-1077ENUS, USA 23.4.2004.
- [Aeroflex 2007] Aeroflex Weinchel, Fixed Coaxial Attenuator Model 1, valmistajan spesifikaatiot 3.1.2007.
- [ANSI 1993] C63.16-1993 American National Standard Guide for Electrostatic Discharge Test Methodologies and Criteria for Electronic Equipment, 22.11.1993, ISBN 1-55937-403-9.
- [Aro 1996] Aro Martti, Elovaara Jarmo, Karttunen Matti etc., Suurjännitetekniikka, Otatieto 568, Espoo 1996, ISBN 951-672-226-1.
- [Ballman 2000] Ballman, Network Analyzer NWA S100/S200 Manual, Version E19/04/00 – 6.31.
- [EA 1999] EA 4/02, European co-operation for Accreditation, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, julkaisu, 12.1999.
- [EMC-Partner 1997] EMC-Partner, User Manual, EMC Tester, Transient-1000, 21.1.1997.
- [EN 1998] 60060-2: 1994/A11:1998, European Committee for Electrotechnical Standardization, High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems, Annex H, 1.1998.

- 
- [Farr 2000] Farr Everett G., Ellibee Donald E., Elizondo Juan M. etc., A Test Chamber for a Gas Switch Using a Hyperboloidal Lens, 3.2000.
- [Glättli 1996] Glättli Peter, What is a real 1 GHz bandwidth ESD generator calibration?, EOS/ESD Symposium 96-180.
- [Hahtela 2000] Hahtela Olli, Kimmelma Ossi, Lahtinen Juha etc., ESD, S-66.171 Elektroniikkalaitteiden suunnittelu, 4.12.2000.
- [Hilty 2001] Hilty Kurt, Ryser Heinrich, Herrmann Ulrich, Calibration of Electrostatic Discharge Generators and Results of an International Comparison, 4.2001.
- [HP 1994] Hewlett Packard, Operating, Programming, and Configuration Manual, Multimeter, HP 3458 A, 2.1994.
- [Huber 1995/1] Huber + Suhner AG, datalehti, 23 N 50 – 0 – 1/133\_N, 18.8.1995
- [Huber 1995/2] Huber + Suhner AG, mittapiirros, 23 N 50 – 0 – 69, 18.8.1995
- [Huber 2006] Huber + Suhner Microwave cable assemblies, testiraportti, Sucoflex 104PEA, 16.10.2006.
- [Hyatt 1993] Hyatt Hugh M., High voltage calibration for ESD diagnostics, EOS/ESD Symposium 93-25.
- [IEC 1995] IEC 61000-4-2, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques – Section 2: Electrostatic discharge immunity test, 1.1995.

- 
- [IEC 2007] IEC 61000-4-2, Draft, 77B/548/CD, 6.4.2007.
- [IEC 2006] IEC 61000-4-2, Comments, 77B/504B/CC, 30.6.2006.
- [IEC 2005] IEC 61000-4-2, Draft, 77B/491/CD, 9.12.2005.
- [IEC 2002/1] IEC 61000-4-2, Draft, 77B/356/CD, 20.9.2002.
- [IEC 2002/2] IEC 61000-4-2, Comments, 77B/367/CC, 27.9.2002.
- [IEC 2001] IEC 61000-4-2, Draft, 77B/307/CD, 2001.
- [IEC 2000] IEC 61000-4-2, Amendment 2, 11.2000.
- [IEC 1998] IEC 61000-4-2, Amendment 1, 1.1998.
- [IEC 1994] IEC 60-2, High-voltage test techniques, Part 2: Measuring Systems, 11.1994.
- [ISO 2001] ISO 10605:2001, International Organization for Standardization, Road vehicles – Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge, 15.12.2001.
- [Ketelaere 2000] Ketelaere W. De, Martens L., Braem Y., Vlietinck Y., Calculation of the ESD-pulse parameters and associated uncertainty for ESD-gun calibration, 2000.
- [Kytönen 2007] Kytönen Rauno, keskustelut, TKK Tietoliikennetekniikan laboratorio. Espoo 2007.

- 
- [LeCroy 2003] LeCroy, Service Manual, Color Digital Oscilloscopes, WaveMaster, DDA 5005 and SDA Series, Version B-3.2003.
- [Lehto 2006] Lehto Arto, Räisänen Antti, RF- ja mikroaaltotekniikka, Otatieto 547, Helsinki 2006, ISBN 951-672-349-7.
- [Lehto 1999] Lehto Arto, Räisänen Antti, Mikroaaltomittaustekniikka, Otatieto 875, Helsinki 1999, ISBN 951-672-209-1.
- [Lehto 1998] Lehto Arto, Räisänen Antti, Radiotekniikka, Otatieto 885, Helsinki 1998, ISBN 951-672-224-5.
- [Lin 1998] Lin D., Pommerenke D., Barth J., Metrology & Methodology of System Level ESD Testing, 1998.
- [Lindell 1997] Lindell Ismo, Aaltojohtoteoria, Otatieto 583, Helsinki 1997, ISBN 951-672-259-8.
- [Lu 2005] Lu Shey-Shi, Lin Yo-Sheng, Chiu Hung-Wei etc., The Determination of S-Parameters From the Poles of Voltage-Gain Transfer Function for RF IC Design., 2005.
- [MathWorks 1996] MathWorks, Matlab Signal Processing Toolbox, 1996.
- [Piironen 2004] Piironen Jukka, Calibration System for Electrostatic Discharge Testers, Espoo 2004.
- [Piironen 2003] Piironen Jukka, Comparison of ESD reference measuring systems at HUT and PTB, TKK-SJT-56, Espoo 2003.
- [Piironen 2001] Piironen Jukka, Aro Martti, Reference measuring system for ESD impulses, TKK-SJT-44, Espoo 2001.

- [Pommerenke 2000] Pommerenke David, kalibroitiraportti, ESD-current target (model number 0701001) 19.7.2000.
- [Pozar 1998] Pozar David M., Microwave Engineering, Second Edition, 1998, ISBN 0-471-17096-8.
- [Silvonen 2007] Silvonen Kimmo, keskustelut, TKK Teoreettisen sähkötekniikan laboratorio, Espoo 2007.
- [Silvonen 2005] Silvonen Kimmo, Sähkötekniikka ja elektroniikka, Otatieto 602, Helsinki 2005, ISBN 951-672-347-0.
- [Stroka 2003] Stroka Jan, Klampfer Wolfgang L., Target influence of the calibration uncertainty of ESD simulators, 2003.
- [Stroka] Stroka Jan, Insertion Loss as Transfer Coefficient for the Calibration of ESD Simulators. Is it sufficient to cope with? <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7550/20565/00950485.pdf>
- [Vlietinck 2000] Vlietinck Ivan, Martens Luc, "ESD generators – compliant to the standard?", julkaisu, 2000.
- [Walt 1998] van der Walt P.W. A Novel Matched Conical Line to Coaxial Line Transition, julkaisu 1998.

## Liite A – Siirtoadmittanssi MATLABilla.

Liitteessä on esitetty siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  laskemiseen tehty yksinkertainen ohjelma. Tekijä S pitää sisällään kompleksiset S-parametrivektorit. Tekijän 50 paikalle sijoitetaan oskilloskoopin sisääntulon impedanssivektori.

```
{  
    f=S(:,1);  
    S11=S(:,2).*exp(i*(S(:,3)/180*pi));  
    S12=S(:,6).*exp(i*(S(:,7)/180*pi));  
    S21=S(:,4).*exp(i*(S(:,5)/180*pi));  
    S22=S(:,8).*exp(i*(S(:,9)/180*pi));  
  
    Y_transfer=((1-S11)./(S21))/50;  
    Y_transferMag=abs(Y_transfer);  
    Y_transferAngle=angle(Y_transfer);  
}
```

## Liite B – Yhtälöitä.

Siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  laskeminen S-parametreista ja oskilloskoopin impedanssivasteesta:

$$Y_{\text{sys}}(f) = \frac{1 - S_{11}(f)}{Z_{50}(f) \cdot S_{21}(f)}$$

Siirtoadmittanssivasteen  $Y_{\text{sys}}(f)$  epävarmuus saadaan laskennallisesti. Yhtälössä osittaisderivoitujen siirtoadmittanssivasteen termit kerrotaan epävarmuustekijöiden epävarmuuksilla:

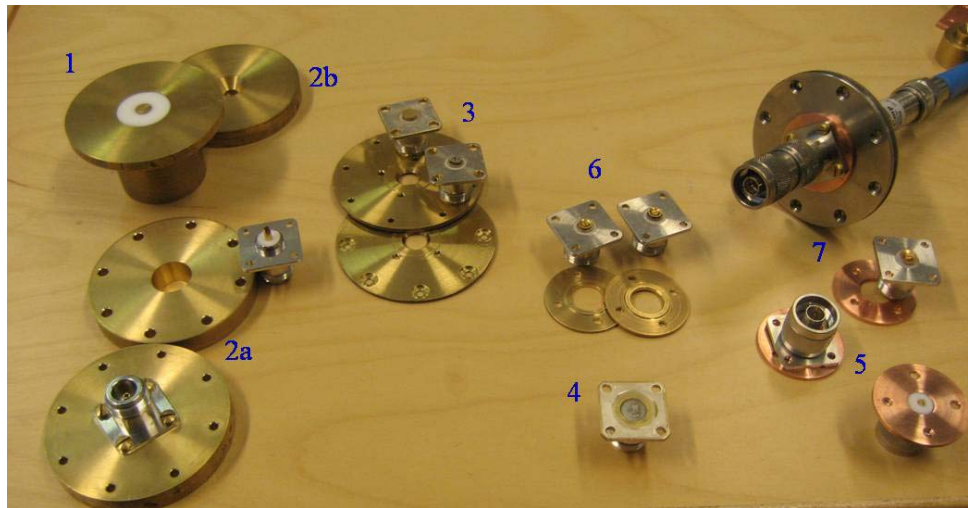
$$\Delta Y_{\text{sys}}(f) = \left| \frac{1}{Z_{50} \cdot S_{21}(f)} \right| \cdot \Delta S_{11}(f) + \left| \frac{1 - S_{11}}{Z_{50}^2 \cdot S_{21}(f)} \right| \cdot \Delta Z_{50}(f) + \left| \frac{1 - S_{11}}{Z_{50} \cdot S_{21}(f)^2} \right| \cdot \Delta S_{21}(f)$$



## Liite C – Kohtioadapterin kehittämisprosessi

Adapterista rakennettiin kaikkiaan 6 erilaista versiota. Prototyyppi 1 (Kuva C.0.1) perustuu kartiosiiirtojohdon yhtälöön. Tätä prototyyppiä ei kuitenkaan kehitetty eteenpäin, koska rakenne on monimutkainen. Muissa prototyypeissa kohtioadapteri pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyenä verrattuna mittauksen taajuuskaistaan. Siirtojohdon pitäisi olla selvästi lyhyempi (korkeintaan kymmenesosa) verrattuna mittalaitteen taajuuskaistasta laskettuun aallonpituuteen ( $\lambda(f=6\text{GHz}) = 2c / 3f = 33 \text{ mm}$ ). Laskennassa käytettiin sähkömagneettisen aallon etenemisnopeudelle  $v_R$  yhtälön 1 mukaista approksimaatiota. N-liittimen ja kohtion mittoja käytettiin prototyyppien 1, 2b, 2a, 3, 4, 5, 6, 7 (Kuva C.0.1) suunnittelun peruslähtökohtina.

$$v_R = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_R}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2,1}} \frac{m}{s} = 2,07 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (1)$$

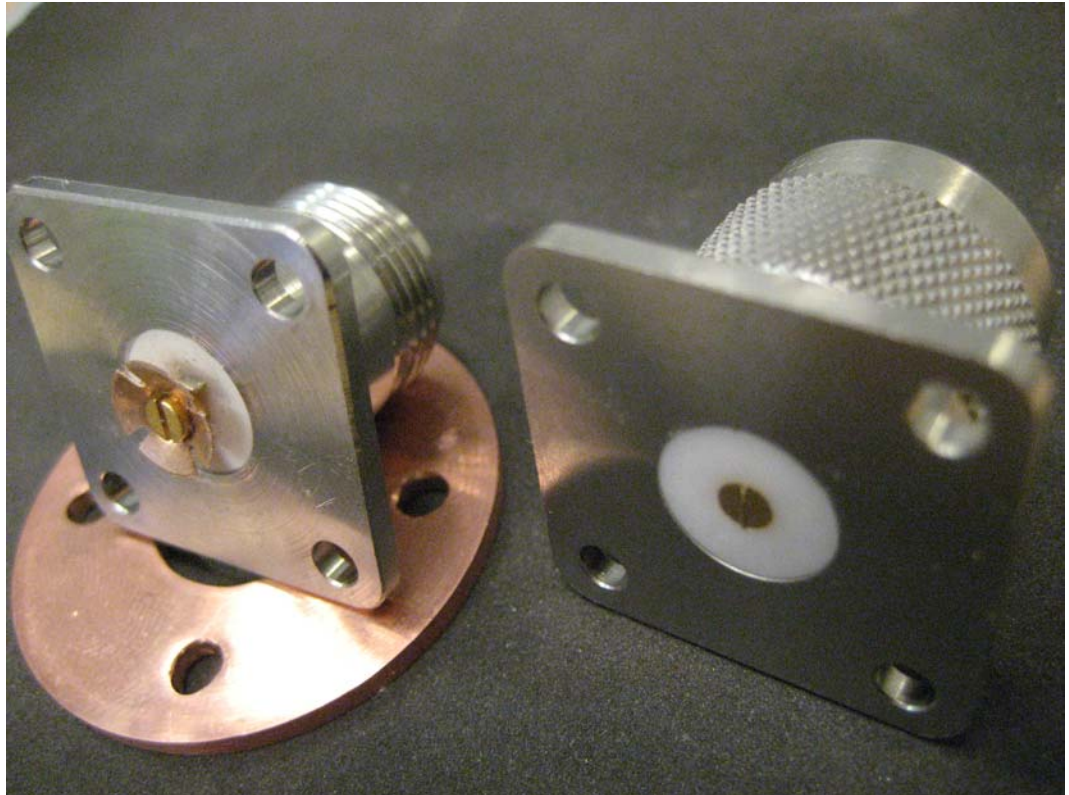


Kuva C.0.1 – Kohtioadapterin prototyyppien rungot 1-7

Prototyyppien suunnittelussa pääpaino oli adapterin mahdollisimman pienellä koolla sekä adapterin ja kohtion välisen kontaktiresistanssin minimoimisella. Pintojen eristyksessä kokeiltiin suihkutettavaa eristysainetta (prototyyppi 3), muovikalvoa, kaksikomponenttiliimaa ja ilmapäliä. Keskikontaktiin suunniteltiin

jousitusta ja tähän kokeiltiin tähtiprikkoja, jousiprikkoja, paineprikkoja ja erilaisia pieniä kullattuja RF-jousia sekä messingistä ja berylliumkuparista taivuteltuja kartioita. Alumiiniteippiä kokeiltiin johtavana ja joustavana pintana, mutta teipin johtavuus osoittautui huonoksi. Kontaktijousien kiinnittämisessä kokeiltiin tinausta, johtavaa ainetta sisältävää kaksikomponenttiliimaa ja mekaanista liitosta. Prototyyppien runkojen kontaktien varmistamiseksi oikeasta kohdasta kokeiltiin alumiiniteippiä ja halutun kontaktikohdan mekaanista korottamista. Halkaisijaltaan pienempään kiekkoon siirryttäessä (prototyypistä 3 prototyypeihin 5, 6 ja 7) saatiin kontakti keskeltä ja kohtioadapterin ja kohtion siirtojohtojen keskeisyys toisiinsa nähden varmistettua. Prototyyppien 1-2 kehittäminen keskeytettiin johtuen rakenteen monimutkaisuudesta. Siirtojohtojen jyrkät muutokset olivat myös ongelma (prototyyppi 2a) samoin kuin sorvauksen epäonnistuminen (prototyyppi 2b).

Viimeisimmät kohtioadapterien prototyypit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia: vasemmalla on N-naarasliitin-malli (prototyyppi 7) ja oikealla N-urosliitin-malli (Kuva C.0.2). Beryllium kuparista tehtyä kehitettyä RF-jousta käytetään vasemmalla olevassa N-naarasliitin-mallissa, jossa tarvitaan myös hyvin johtava kiekko runkokontaktiresistanssin minimoimiseksi. N-urosliitin-mallissa ei tarvita kuparikiekkoa, koska keskijohtimen siirtojohto on samassa tasossa rungon kanssa. Taajuusvasteeltaan mallit ovat lähes yhtä hyviä kuin kaupalliset kohtioadapterit. Rakenteiden etuna on yksinkertaisuus ja valmistamisen edullisuus, mikä helpottaa niihin liittyvää käyttöä ja ylläpitoa.



*Kuva C.0.2 – Yksinkertainen kohtioadapteri*

Kohtioadaptoreiden standardiluonnoksen [IEC 2005] vaatimukset eivät täyty kummallakaan adapterilla, jolloin taajuusvastekorjausta pitää käyttää. N-naarasliitin-mallin beryllium jousi ja kuparikiekko kullataan, koska kulta on erittäin hyvin johtava materiaali eikä se hapetu yhtä nopeasti kuin esimerkiksi hopea tai kupari. N-urosliitin malliin tarvittaisiin erittäin hyvin johtavaa ja joustavaa ainetta keskijohtimen pintaan, jotta sen keskijohtimesta saataisiin enemmän jousimainen. Tehdyissä mittauksissa molempien mallien taajuusvaste on ollut toistettava ja luonnoksien vaatimukset täyttävä noin 3 GHz:n taajuuskaistalla (luvut 3.3 ja 3.4).

## Liite D – Piirianalysaattorin kalibrointi ja kalibroitirajapinta

Kalibroitirajapinnat ovat piirianalysaattorin porttien 1 ja 2 liittimet (Kuva 3.13). Tarvittaessa liittämiin 1 ja 2 voidaan kytkeä erilaisia adaptereja tai vaimentimia, joiden aiheuttama virhe voidaan kalibroida mittauksesta pois. SOLT (short, open, load, through) -kalibrointiin tarvitaan porttien liittämiin sopivat  $50\ \Omega$  kuorma, avoin piiri, oikosulku ja siirtojohto portista toiseen [Silvonen 2006][Agilent 2002]. Kun toinen piirianalysaattorin porteista kiinnitetään kohtioadapteriin, kohtion kontaktipinnan ja kalibroitipinnan välille jää etäisyys, joka aiheuttaa heijastusparametriin  $S_{11}$  viiveen. Viive voidaan mitata piirianalysaattorilla kytkemällä kohtioadapterin kontaktipinta oikosulkuun.

Kohtioadapterin prototyypille 6 mitattu viive oli noin 90 ps. Tähän verrattava arvo voidaan laskea yhtälöllä 3.3 [Kytönen 2007], missä pituus  $l$  kalibroitirajapinnasta kohtion kontaktipintaan on noin 10 mm, josta noin 2 mm on ilmaeristeistä ja noin 8 mm tefloneristeistä (kohtioadapteri). Koska kalibroitirajapinta ei ole kohtion pinnassa, täytyy rajapinnan ja kohtion välisen matkan synnyttämä viive poistaa  $S_{11}$  heijastusvaimennuksesta. Kalibroitirajapinnan viive yhteen suuntaan saadaan aallon etenemisnopeudesta  $v_R$  (Liite C – Kohtioadapterin kehittämisprosessi) ilmaeristeessä ja teflonissa kerrottuna vastaavilla matkoilla (yhtälö 2).

$$t = \frac{0,008m}{\frac{3 \cdot 10^8 m}{\sqrt{2,1} \cdot s}} + \frac{0,002m}{\frac{3 \cdot 10^8 m}{\sqrt{1} \cdot s}} = 45,3 ps \quad (2)$$

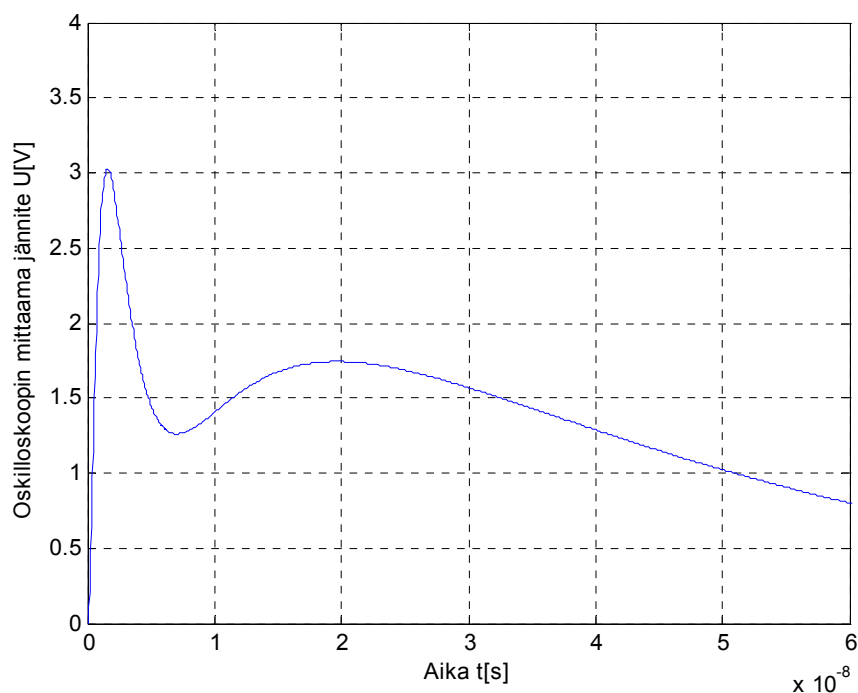
Kun tämä kerrotaan kahdella, saadaan aallon viiveeksi noin 91 ps kalibroitirajapinnasta kohtion pintaan ja takaisin kalibroitirajapintaan. Jos kalibroitirajapinnat ovat riittävän lähellä kohtion kontaktipintaa, ei viiveen korjausta tarvita. Viiveen virheellisyydestä seuraa vakavia ongelmia lopulliselle taajuustason virheen korjauskertoimelle (luku 4.2.2).

**Liitteen D lähteet**

- [Silvonen 2006] Silvonen Kimmo, Piirianalysointilaitteiden kalibrointi ja sirontaparametrit, 21.4.2006.
- [Agilent 2002] Agilent AN 1287-3, Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements, 27.3.2002.

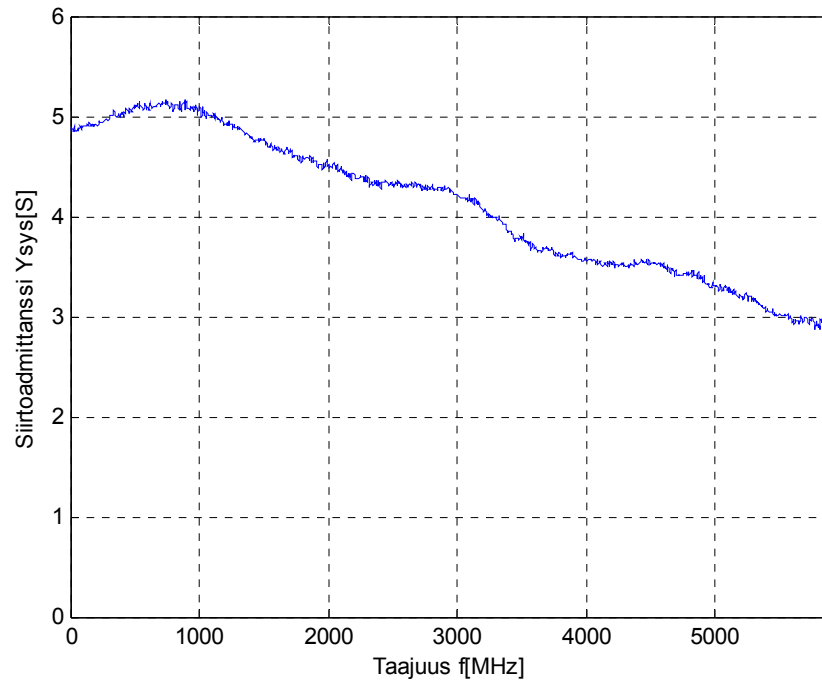
## Liite E – Monte Carlo-menetelmä

Yksittäisen ESD-testauslaitteen kalibroinnista saatavat epävarmuudet eivät vastaa toisen saman tyyppin ESD-testauslaitteen epävarmuuksia. Siksi kalibrointijärjestelmän arvostelussa on perusteltua käyttää ESD-impulssin matemaattista mallia yksittäisen ESD-testauslaitteen sijasta. Vuoden 2005 standardiluonnoksen [IEC 2005] matemaattisen mallin virta on suhteutettu vakio kertoimella mallintamaan oskilloskoopin jännitettä (Kuva E.0.1).



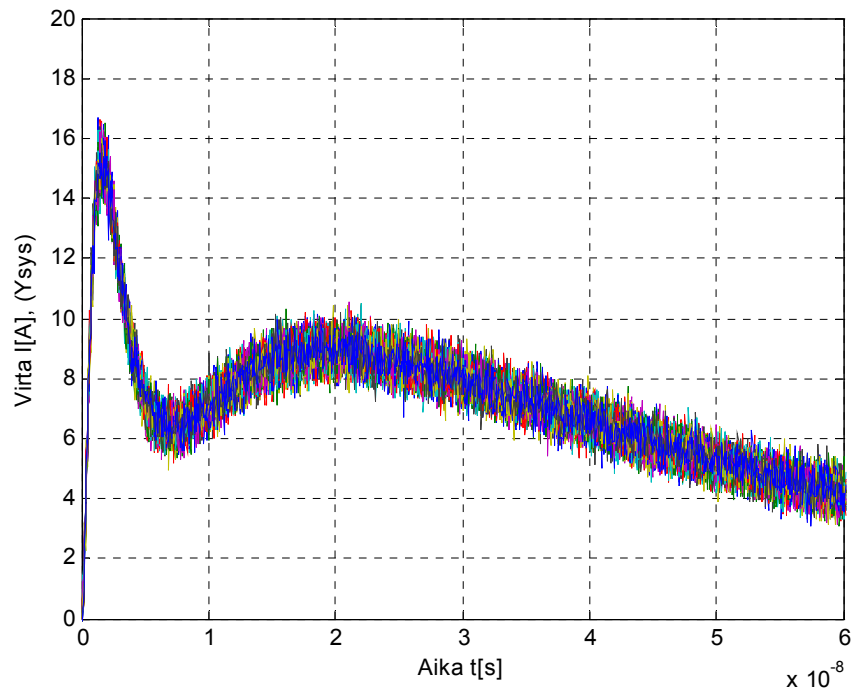
Kuva E.0.1 – Oskilloskoopin jännite

Siirtoadmittanssi  $Y_{\text{sys}}(f)$  lasketaan kohtioadapterin, kohtion, vaimentimen ja kaapelin mitatuista S-parametreista ja oskilloskoopin impedanssivasteesta (Kuva E.0.2).



Kuva E.0.2 – Siirtoadmittanssivaste  $Y_{sys}(f)$

Epävarmuudet määritetään Monte Carlo-menetelmällä (Kuva E.0.3). Kuvan menetelmässä on käytetty siirtoadmittanssivasteen  $Y_{sys}(f)$  epävarmuutena 3,5% ja oskilloskoopin jännitemittauksen epävarmuutena 1%. Monte Carlo-menetelmän tuloksesta lasketaan haluttujen ESD-parametrien  $I_p$ ,  $I_{30}$ ,  $I_{60}$ ,  $t_r$  keskihajonnat, jotka vastaavat lopullisia epävarmuuksia taajuusvastevirheen korjausta käytettäessä.



Kuva E.0.3 – Siirtoadmittanssilla korjattu  $i_n(t_n)$  ja Monte Carlo-menetelmä

Monte Carlo-menetelmä MATLABilla on esitetty seuraavassa. Laskennassa on käytetty standardiepävarmuuksia keskihajontoina.

```
load u
load S

format long

% Keskihajonnat
std_y = 0.0175;
std_u = 0.005;

% Monte-Carlo-simulaatioiden määrä
N = 50;

% Aikaindeksit
% t60

% Lasketaan Siirtoadmittanssi
y_t=S(:,1);
S11=S(:,2).*exp(i*(S(:,3)/180*pi));
S21=S(:,4).*exp(i*(S(:,5)/180*pi));
y_s=((1-S11)./(S21))/50;
Y(:,:)=(y_t,y_s);

% Interpoloidaan saman suuruiseksi
y_t = interp(Y(:,1), floor(length(u)/length(Y)));
y_s = interp(Y(:,2), floor(length(u)/length(Y)));
u_t = u(length(u)-length(y_s)+1:end,1);
```



---

```
u_s = u(length(u)-length(y_s)+1:end,2);

n = length(y_s);

% Monte-Carlo-näytteiden luonti
for i = 1:N
    MC_y(:,i) = y_s + sqrt(std_y)*randn(n,1);
    MC_u(:,i) = u_s + sqrt(std_u)*randn(n,1);
end

% Lasketaan virtapulssi
for i = 1:N
    i_pulse(:,i) = ifft(fft(MC_u(:,i))).*MC_y(:,i);
end

% Otetaan näytteitä halutuista kohdista
for i = 1:N
    peak(i) = max(i_pulse(:,i));
    s60(i) = i_pulse(t60,i);
    s30(i) = i_pulse(t30,i);
end

std = sqrt(var(peak))
m = mean(peak)
max_peak = max(peak)
min_peak = min(peak)

plot(i_pulse)
```